



**Bruno Miguel da Silva Rosa**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Ligação pavimento-paredes de edifícios antigos por conectores metálicos. Avaliação experimental**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ildi Cismasiu, FCT

Arguente: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues, FCT

Vogal: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho, FCT



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Novembro de 2017**



**Ligação pavimento-paredes de edifícios antigos por conectores metálicos. Avaliação experimental**

Copyright © Bruno Miguel da Silva Rosa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Professor Fernando Pinho, meu orientador e ao Professor Válder Lúcio, meu coorientador, pelos ensinamentos transmitidos, orientação e apoio prestados no decurso deste trabalho.

Ao Dr. Jorge Silvério, técnico de laboratório do DEC, o meu enorme agradecimento por todo o auxílio e apoio incansável durante todo o trabalho, em particular durante a preparação e montagem do ensaio experimental. Obrigado pela constante boa vontade e amizade demonstrada durante todo o percurso.

Ao Sr. José Gaspar, técnico de laboratório do DEC, um agradecimento pela ajuda constante e experiência transmitida durante a preparação do ensaio experimental.

Ao Engenheiro Vítor Silva pela sua contribuição no decorrer deste trabalho, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

Ao Engenheiro Hugo Fernandes pela constante disponibilidade, boa vontade e auxílio prestado na montagem e monitorização dos ensaios experimentais.

Aos Engenheiros Nuno Travassos e Rui Pombo (*A2P Consult*), a disponibilidade e rapidez com que responderam aos meus emails, agradeço pelos contatos e elementos fornecidos.

A todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, pelos bons momentos passados ao longo destes anos.

À Teresa, um agradecimento especial por todo o apoio, paciência e carinho demonstrado ao longo destes anos. Pela presença e pela força dada em todos os bons e maus momentos passados.

À minha família, em especial aos meus pais, Paula e Fernando, pelo carinho, apoio moral e sacrifícios que fizeram por mim ao longo destes anos. Por me proporcionarem a oportunidade de concretizar este objetivo, e nunca terem deixado de acreditar que seria capaz apesar de todas as dificuldades encontradas pelo caminho.



# Resumo

A presente dissertação, desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pretende analisar o comportamento de ligações pavimento-parede simuladas através de um modelo experimental em alvenaria de pedra com conectores metálicos, contribuindo para a sua adaptação a modelos de cálculo, como o modelo de *dowel-action* (inicialmente desenvolvido para estruturas de BA), para estimar as forças envolvidas na ligação.

Inicialmente foi feita uma pesquisa bibliográfica, de modo a estudar e a compreender o comportamento dos elementos construtivos de edifícios antigos, nomeadamente, paredes de alvenaria de pedra, pavimentos de madeira e a ligação entre eles. Foram analisados os problemas estruturais decorrentes de cada elemento e da ligação e identificadas as soluções de reforço habitualmente adotadas na sua resolução.

Posteriormente foram estudados alguns trabalhos de investigação realizados a nível nacional relacionados com a temática do trabalho. É feito ainda referência aos trabalhos realizados dentro da mesma linha de investigação iniciada em 2013, no DEC FCT-UNL.

A campanha experimental realizada focou-se no estudo do comportamento da ligação face às cargas verticais, na quantificação da sua capacidade de carga e na resistência à compressão axial através de um modelo experimental em alvenaria de pedra (murete). Além disso, é ainda determinada a profundidade de carbonatação da argamassa constituinte.

## **Palavras-chave:**

Ligação pavimento-parede; alvenaria de pedra; pavimento de madeira; conectores metálicos; compressão axial; carbonatação; mecanismo de ferrolho.





## **Abstract**

The present dissertation developed in the Department of Civil Engineering of the Faculdade de Ciências e Tecnologia of Universidade Nova de Lisboa, intends to analyze the behavior of floor-wall connections simulated through an experimental model in stone masonry with metallic connectors, contributing to its adaptation to models such as the dowel-action model (initially developed for RC structures), to estimate the forces involved in bonding.

Initially a bibliographical research was done in order to study and understand the behavior of the constructive elements of old buildings, namely stone masonry walls, wooden floors and the connection between them. The structural problems arising from each element and the connection between them were analyzed and the reinforcement solutions usually adopted in its resolution were identified.

Subsequently, some research work carried out at the national level related to the subject was studied. Reference is also made to the work carried out within the same line of research initiated in 2013, at DEC FCT-UNL.

The experimental campaign was focused on the study of the behavior of the connection with the vertical loads, the quantification of its load capacity and the resistance to axial compression through an experimental model in stone masonry. Additionally, the depth of carbonation of the constituent mortar is further determined.

### **Keywords:**

floor-wall connection; stone masonry; timber floor; metallic connectors; axial compression; carbonation; dowel action.



# Índice do Texto

## 1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral .....	1
1.2 Motivação e objetivos .....	2
1.3 Estrutura e organização da dissertação .....	2

## 2. ENQUADRAMENTO DO TEMA

2.1 Considerações iniciais.....	5
2.2 Caracterização de paredes de edifícios antigos.....	5
2.2.1 Caracterização de acordo com a função e finalidade.....	5
2.2.2 Caracterização de acordo com o tipo de materiais utilizados .....	6
2.3 Caracterização de pavimentos de madeira.....	7
2.4 Anomalias comuns em edifícios antigos .....	8
2.4.1 Principais anomalias em paredes .....	8
2.4.2 Principais anomalias em pavimentos de madeira .....	12
2.5 Principais ligações pavimento-paredes de edifícios antigos .....	14
2.6 Técnicas gerais de reforço de paredes e pavimentos.....	15
2.6.1 Reforço de paredes de alvenaria de pedra .....	16
2.6.2 Reforço de pavimentos de madeira .....	21
2.6.3 Reforço de ligações parede-pavimento .....	24

## 3. TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE OUTROS AUTORES

3.1 Considerações iniciais.....	25
3.2 Trabalhos experimentais inseridos no tema das ligações pavimento-paredes .....	26
3.2.1 Trabalho de S. Moreira, et al (2014) a).....	26
3.2.2 Trabalho de S. Moreira, et al (2014) b).....	28
3.3 Trabalhos experimentais dentro da mesma linha de investigação.....	29
3.3.1 Trabalho de S. Martins (2014) .....	31
3.3.2 Trabalho de L. Simões (2015).....	33
3.3.3 Trabalho de C. Justiniano (2016) .....	35
3.3.4 Trabalho de V. Hritiu (2016) .....	38

## 4. TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 Considerações iniciais.....	41
4.2 Caracterização do murete M206.....	41

4.3 Trabalhos de preparação do murete M206 .....	42
4.3.1 Regularização da superfície do murete .....	42
4.3.2 Identificação, limpeza e colocação do lintel .....	44
4.3.3 Realização de furos no murete .....	45
4.3.4 Colocação de varões roscados, execução e injeção de calda de cimento nos furos .....	46
4.4 Caracterização dos materiais .....	47
4.5 Preparação do sistema e instrumentação de ensaio.....	49
4.6 Ensaios realizados no murete M206.....	53
4.6.1 Ensaio da ligação pavimento-parede às cargas verticais.....	53
4.6.2 Ensaio de Compressão axial .....	63
4.6.3 Carbonatação .....	66
 <b>5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	
5.1 Considerações iniciais.....	67
5.2 Análise de resultados do ensaio da ligação pavimento-parede.....	67
5.2.1 Mecanismo de ferrolho (dowel action).....	70
5.3 Verificação de Tensões .....	74
5.4 Análise dos resultados da compressão axial e comparação com trabalhos de referência .75	
5.5 Análise dos resultados da profundidade de carbonatação e comparação com trabalhos de referência.....	77
 <b>6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	
6.1 Considerações iniciais.....	79
6.2 Conclusões .....	79
6.3 Trabalhos futuros .....	80
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>
 <b>ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>85</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de paredes de acordo com a finalidade .....	6
Figura 2.2 – Representação esquemática identificando as paredes de acordo com a natureza e características dos materiais utilizados .....	7
Figura 2.3 – Pavimento de madeira .....	8
Figura 2.4 – Desagregação da alvenaria .....	9
Figura 2.5 – Fendilhação da parede em zona corrente .....	10
Figura 2.6 – Presença de fungos .....	11
Figura 2.7 – Eflorescências e criptoflorescências .....	12
Figura 2.8 – Edifícios de alvenaria de pedra degradados, Bragança .....	12
Figura 2.9 – Anomalias devido a ações humanas .....	13
Figura 2.10 – Anomalias devido a ações naturais .....	13
Figura 2.11 – Anomalias devido a ações acidentais .....	14
Figura 2.12 – Ligações pavimento-parede .....	15
Figura 2.13 – Tipos de injeção .....	17
Figura 2.14 – Representação esquemática do processo de injeção por pressão .....	17
Figura 2.15 – Representação esquemática do processo de refechamento de juntas .....	18
Figura 2.16 – Representação esquemática de parede de alvenaria de pedra reforçada com reboco armado .....	19
Figura 2.17 – Representação esquemática de processo de encamisamento de uma parede ..	19
Figura 2.18 – Representação esquemática de elementos de confinamento transversal .....	20
Figura 2.19 – Representação esquemática do processo de desmonte e reconstrução .....	21
Figura 2.20 – Ligação entre peças de madeira com chapa de aço e parafusos .....	22
Figura 2.21 – Representação esquemática de aumento da secção transversal de uma viga de madeira .....	22
Figura 2.22 – Reforço de pavimento com adição de laje de betão armado .....	23
Figura 2.23 – Reforço da ligação pavimento-parede com recurso a cantoneira metálica .....	24

Figura 3.1 – Representações esquemáticas da ligação pavimento-parede .....	26
Figura 3.2 – Modos de rotura da ligação .....	27
Figura 3.3 – Representação esquemática do modelo experimental e sistema de ensaio .....	28
Figura 3.4 – Representação esquemática de modelo experimental simples (M43, M21 e M32) ..	30
Figura 3.5 – Representação esquemática do posicionamento dos furos e da cantoneira .....	31
Figura 3.6 – Aspeto geral do sistema de ensaio .....	32
Figura 3.7 – Modelo experimental (murete) M213 .....	34
Figura 3.8 – Representação esquemática dos muretes e introdução de <i>grout</i> .....	34
Figura 3.9 – Disposição da rede metálica no murete .....	36
Figura 3.10 – Representação esquemática das furações no murete M214 .....	37
Figura 3.11 – Representação esquemática das furações no murete M205 .....	39
Figura 4.1 – Aspeto do murete M206.....	42
Figura 4.2 – Regularização da superfície do murete M206 para apoio da cantoneira .....	42
Figura 4.3 – Execução das camadas de regularização do murete M206.....	43
Figura 4.4 – Colocação de lintel em betão armado sobre o murete M206 .....	44
Figura 4.5 – Furações no murete .....	45
Figura 4.6 – Nivelamento da superfície tardo ao apoio com argamassa cimentícia e chapas metálicas de ancoragem .....	46
Figura 4.7 – Procedimento de injeção da calda .....	47
Figura 4.8 – Aperto das porcas utilizando chave dinamométrica .....	47
Figura 4.9 - Ensaios mecânicos realizados na argamassa de regularização da superfície e na calda de cimento .....	48
Figura 4.10 – Procedimento experimental para determinação da baridade .....	48
Figura 4.11 – Instrumentação de ensaio.....	51
Figura 4.12 – Vista frontal do ensaio compressão axial (adaptado a ensaio de ligação parede-pavimento).....	51
Figura 4.13 – Vista em planta da localização dos defletómetros, células de carga e cilindros hidráulicos .....	52
Figura 4.14 – Vista em corte do ensaio de ligação parede-pavimento.....	52

Figura 4.15 – Aspeto geral do sistema de ensaio de ligação parede-pavimento .....	53
Figura 4.16 – Pormenor de contato entre vigas .....	54
Figura 4.17- Ligação no nível superior.....	54
Figura 4.18 – Danos resultantes do carregamento no ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa) .....	55
Figura 4.19 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa).....	56
Figura 4.20 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa) .....	56
Figura 4.21 – Diagrama força-rotação do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa).....	57
Figura 4.22 – Ensaio da ligação no nível inferior (1ª tentativa).....	57
Figura 4.23 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa) ..	58
Figura 4.24 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa).....	58
Figura 4.25 - Diagrama força-rotação do ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa)...	59
Figura 4.26 – Ensaio na ligação no nível intermédio (2ª tentativa).....	59
Figura 4.27 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa).....	60
Figura 4.28 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa) .....	60
Figura 4.29 – Diagrama força-rotação do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa).....	61
Figura 4.30 – Ensaio da ligação no nível inferior (2ª tentativa).....	61
Figura 4.31 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação inferior do murete M206 (2ª tentativa) ..	62
Figura 4.32 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação inferior do murete M206 (2ª tentativa).....	62
Figura 4.33 - Diagrama força-rotação do ensaio da ligação inferior do murete M206 (2ª tentativa)...	63
Figura 4.34- Vista do ensaio de compressão axial do murete M206.....	63
Figura 4.35 – Ensaio de compressão axial do murete M206.....	64
Figura 4.36 - Diagrama Força-Tempo do ensaio de compressão axial ao murete M206 .....	65

Figura 4.37 - Diagrama Tensão-Deformação do ensaio de compressão axial ao murete M20665	
Figura 4.38- Medição da profundidade de carbonatação .....	66
Figura 5.1 - Representação esquemática do mecanismo utilizado para determinar de $F_{tr}$ .....	72
Figura 5.2 - Representação esquemática do modelo de cálculo das tensões aplicado .....	74
Figura 5.3 – Diagrama de comparação de resultados da resistência à compressão .....	76
Figura 5.4 – Diagrama da evolução da resistência à compressão da alvenaria em relação ao rácio de carbonatação da argamassa .....	77
Figura 5.5 – Diagrama da evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo .....	77



## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Trabalhos experimentais analisados.....	25
Tabela 3.2 – Resultados obtidos dos ensaios de arrancamento .....	27
Tabela 3.3 – Resultados obtidos dos ensaios de arrancamento .....	29
Tabela 3.4 – Resultados do ensaio de compressão axial dos muretes de referência .....	31
Tabela 3.5 – Resultados obtidos do ensaio das ligações .....	32
Tabela 3.6 – Resultados obtidos dos ensaios de compressão axial .....	33
Tabela 3.7 – Profundidade de carbonatação média .....	33
Tabela 3.8 – Resultados obtidos do ensaio de ligação parede-pavimento .....	35
Tabela 3.9 – Resultados obtidos do ensaio de compressão axial .....	35
Tabela 3.10 – Profundidade de carbonatação média .....	35
Tabela 3.11 – Resultados obtidos do ensaio de ligação parede-pavimento .....	37
Tabela 3.12 – Resultados obtidos do ensaio de compressão axial .....	37
Tabela 3.13 – Profundidade de carbonatação média .....	38
Tabela 3.14 – Resultados obtidos do ensaio de ligação parede-pavimento .....	39
Tabela 3.15 – Resultados obtidos do ensaio de compressão axial .....	39
Tabela 3.16 – Profundidade de carbonatação média .....	39
Tabela 4.1 – Baridade dos materiais utilizados na argamassa .....	49
Tabela 4.2 – Instrumentação utilizada nos ensaios .....	50
Tabela 4.3 – Valores máximos registados no ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa) .....	56
Tabela 4.4 – Valores máximos registados no ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa) .....	58
Tabela 4.5 – Valores máximos registados no ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa) .....	60
Tabela 4.6 – Valores máximos registados no ensaio do nível inferior do murete M206 (2ª tentativa) .....	61
Tabela 4.7 – Profundidade de carbonatação M206 .....	66

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio da ligação às cargas verticais obtidos para o murete M206 ...	67
Tabela 5.2 - Resultados obtidos para o ensaio das ligações por autores dentro da mesma linha de investigação.....	69
Tabela 5.3 - Valores obtidos para determinação da resistência máxima de corte, através da expressão 5.8.....	71
Tabela 5.4 - Valores obtidos para determinar a resistência máxima de corte, através da expressão 5.9.....	73
Tabela 5.5 - Esforços atuantes no murete durante o ensaio das ligações.....	74
Tabela 5.6 - Verificações de tensão.....	75

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

### Abreviaturas:

<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de Cálcio
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Hidróxido de Cálcio
<b>CaO</b>	Óxido de Cálcio
<b>CaO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>CC</b>	Célula de carga
<b>CEN</b>	Comité Europeu de Normalização
<b>DEC</b>	Departamento de Engenharia Civil
<b>FCT</b>	Faculdade de Ciências e Tecnologia
<b>GFRP</b>	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (polímero reforçado com fibra de vidro)
<b>IST</b>	Instituto Superior Técnico
<b>LabDEC</b>	Laboratório de Estruturas Pesadas do DEC/FCT
<b>LVDT</b>	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
<b>UM</b>	Universidade do Minho

### Símbolos:

<b>A<sub>s</sub></b>	Secção resistente
<b>δ</b>	Deslocamento
<b>ε</b>	Deformação
<b>ξ</b>	Relação entre a tensão axial da pregagem e o valor de cálculo da resistência à tração do aço
<b>θ</b>	Rotação
<b>Ø<sub>b</sub></b>	Diâmetro do varão
<b>f<sub>cd</sub></b>	Valor de cálculo da resistência à compressão do betão

<b><math>f_{yd}</math></b>	Valor de cálculo da tensão de cedência do aço
<b><math>F_{TR}</math></b>	Força de tração
<b><math>F_{um}</math></b>	Resistência ao corte
<b><math>e</math></b>	Excentricidade da força
<b><math>\gamma_{Rd}</math></b>	Coeficiente parcial

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento geral

As cidades vão presenciando cada vez mais a degradação crescente das suas estruturas urbanas. Este facto é motivado pelo próprio envelhecimento dos edifícios, pela sobrecarga do uso ou pelo desajustamento dos edifícios a novos modos de vida. Como tal, surge a necessidade de intervir de modo a preservar o património histórico edificado, tornando o mesmo adequado a novos usos. Estas intervenções deverão ser regidas por um conjunto de boas práticas e estratégias adequadas, de modo a atuar em todas as vertentes, sejam elas a nível estético, energético ou estrutural. Desta forma, cada vez mais é indispensável a existência de um desenvolvimento sustentável nas cidades, o qual leva a um menor impacto ambiental comparado com a construção de novos edifícios. É nos centros urbanos que é mais visível a progressiva degradação da maioria do edificado antigo (Rosa, 2013).

Em Portugal, as estruturas denominadas antigas representam cerca de 65% de todo o edificado nacional. Estão incluídas nesta percentagem as estruturas com paredes em alvenaria de pedra ordinária e com pavimentos de madeira (INE, 2011).

A reabilitação de edifícios antigos de alvenaria de pedra é cada vez mais importante, pois é essencial o estudo de técnicas e materiais que sejam compatíveis com as suas necessidades, de forma a preservar e proteger o património existente, mantendo o seu valor histórico, arquitetónico, científico e cultural. Os edifícios antigos, decorrendo, quer das características dos elementos de construção que os constituem, quer das anomalias que se pode manifestar nesses elementos, necessitam de intervenções de reabilitação que os tornem adequados à sua utilização, de acordo com as exigências que atualmente se colocam.

A segurança sísmica é um dos pontos essenciais a ter em consideração quando se adotam soluções construtivas de reabilitação, pois é das ações com maior impacto destruidor nestes edifícios. É bastante comum os edifícios de alvenaria de pedra possuírem uma baixa resistência face à ação sísmica, pois estes não têm integridade estrutural, devido à falta de ligações efetivas entre as paredes e os pavimentos. Sempre que o pavimento não está adequadamente ligado às paredes adjacentes, ou a rigidez no plano não é adequada, podem acontecer diferentes mecanismos de colapso envolvendo as paredes perpendiculares à direção do sismo (Baião, 2012).

Desta forma, é imperativo encontrar técnicas que permitam aumentar a resistência da ligação parede-pavimento, garantindo sempre que possível a mínima intrusão na construção existente e máxima durabilidade das intervenções a efetuar.

## 1.2 Motivação e objetivos

As ligações parede/pavimento têm uma enorme importância ao nível da segurança, tendo em conta o comportamento sísmico dos edifícios, como ao nível das exigências de habitabilidade e conforto exigido hoje em dia pela comunidade.

A presente dissertação é elaborada com o objetivo de analisar e estudar a ligação entre pavimentos e paredes de alvenaria de pedra tradicional com conectores metálicos. Este estudo integra-se numa linha de investigação iniciada em 2013 no DEC FCT-UNL.

O trabalho experimental simula uma situação real de reforço de edifícios antigos através de um modelo experimental (murete) de alvenaria tradicional. Do seu estudo pretende-se:

- Continuar a linha de investigação existente, procurando analisar e aprofundar os conhecimentos sobre as ligações pavimento-parede.
- Analisar o comportamento entre o pavimento e a alvenaria de pedra com conectores metálicos.
- Quantificar a capacidade de carga da ligação por conectores metálicos quando sujeita a cargas verticais.
- Quantificar a resistência à compressão do murete e determinar a profundidade de carbonatação da argamassa constituinte
- Determinar as forças envolvidas na ligação através da sua adaptação ao modelo de *dowel-action* (*Model Code 1990*).
- Comparar os resultados obtidos com os trabalhos de outros autores desenvolvidos no DEC FCT UNL.

## 1.3 Estrutura e organização da dissertação

O presente documento encontra-se estruturado em 6 capítulos, conforme se expõe em seguida.

No **Capítulo 1 – Introdução** é feito um enquadramento inicial ao tema do trabalho, são apresentados os objetivos que se pretendem obter com a sua realização e é descrita a organização da mesma.

No **Capítulo 2 – Enquadramento do tema** é feita uma abordagem geral ao tipo de paredes e pavimentos existentes em edifícios antigos, bem como as possíveis anomalias a que estes elementos podem estar sujeitos. Seguidamente faz-se uma abordagem relativa aos principais

tipos de ligações parede/pavimento existentes em edifícios antigos. No final, são descritas as técnicas de reabilitação e reforço respeitantes às paredes de alvenaria, aos pavimentos de madeira e às ligações entre estes elementos.

No **Capítulo 3 – Trabalhos experimentais de referência** apresentam-se resultados de trabalhos de diversos autores no domínio do tema das ligações pavimentos-paredes. São também apresentados os trabalhos de investigação, realizados no DEC FCT UNL, que se inserem na presente linha de investigação.

No **Capítulo 4 – Trabalho Experimental** é descrita a componente experimental do trabalho, começando pela descrição dos trabalhos de preparação do modelo experimental de alvenaria de pedra e, posteriormente os ensaios realizados e os resultados obtidos em cada um deles. Apresentam-se ainda os resultados referentes à determinação da profundidade de carbonatação do modelo experimental ensaiado.

No **Capítulo 5 – Análise e discussão de resultados** é feita uma análise e comparam-se os resultados obtidos, em termos teóricos e experimentais, com trabalhos de referência.

No **Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros** apresenta-se uma síntese do trabalho realizado, as principais conclusões e apresentam-se algumas sugestões de continuidade desta investigação.





# Capítulo 2

## Enquadramento do tema

### 2.1 Considerações iniciais

No presente capítulo é feito o enquadramento teórico do tema a desenvolver no âmbito da presente dissertação. Com base numa pesquisa bibliográfica, começa-se por fazer uma caracterização construtiva dos edifícios antigos, abordando-se o tipo de paredes existentes, os pavimentos utilizados e os tipos de ligação entre eles. Descrevem-se soluções de reforço individuais, de cada um dos elementos referidos anteriormente, e da respetiva ligação.

### 2.2 Caracterização de paredes de edificios antigos

De uma forma geral, as soluções construtivas das paredes de alvenaria de pedra podem ser definidas consoante a função e fim a que se destinam, classificando-se como paredes resistentes ou mestras e paredes divisórias ou de compartimentação, ou de acordo com a natureza e características dos materiais constituintes (Pinho, 2000; Appleton, 2003).

#### 2.2.1 Caracterização de acordo com a função e finalidade

Designam-se por paredes resistentes ou mestras, os elementos utilizados na construção que assumem um papel significativo na estrutura do edifício no que se refere à resistência, Figura 2.1 a). Este tipo de paredes é constituído por materiais heterogéneos capazes de apresentar uma boa capacidade de resistência à compressão, mas menor resistência ao corte e baixa resistência à tração. Estas apresentam geralmente uma grande espessura, entre os 0,5 e 1,5 m, que proporciona uma barreira entre o exterior e o interior, dificultando a circulação do ar e da água da chuva até ao interior do edifício. O longo período de tempo que demora para que estes elementos atravessem a totalidade da espessura da parede durante a época de chuva é suficiente para que retorne o tempo seco, e a água infiltrada realize o percurso inverso (Appleton, 2003).

Designam-se por paredes divisórias ou de compartimentação, os elementos que não recebem diretamente as cargas verticais, mas que ainda assim, devido à sua arquitetura ou à sua organização espacial, desempenham funções estruturais importantes garantindo o travamento geral da estrutura através da sua interligação, Figura 2.1 b). Estas paredes distinguem-se das anteriores por apresentarem espessuras muito menores, o que tem influência no aspeto funcional e no comportamento mecânico das mesmas. Originalmente, as paredes divisórias

tinham como principal funcionalidade garantir a separação dos espaços delimitados por paredes resistentes (Appleton, 2003).



a) - Parede resistente de alvenaria de pedra ordinária; b) - Parede divisória em tabique (Ribeiro, 2014).

Figura 2.1 – Tipos de paredes de acordo com a finalidade

### 2.2.2 Caracterização de acordo com o tipo de materiais utilizados

As paredes de edifícios antigos podem apresentar características diferentes consoante o tipo de materiais com que são construídas. Estes materiais influenciam diretamente o comportamento global das paredes em termos de resistência. De seguida são apresentados os tipos de paredes com a respetiva constituição (Pinho, 2000):

- As paredes exteriores, ou de uma forma geral, todas as que desempenham funções resistentes, designadas anteriormente por “*paredes mestras*” podem ser constituídas por alvenaria de pedra (granito, xisto, calcário) ou tijolo (cerâmico, adobe).
- As paredes interiores resistentes podem ser designadas de “*frontais*” e são formadas por um esqueleto de madeira envolvido por alvenaria, como é exemplo a gaiola pombalina.
- As paredes interiores não resistentes, designadas anteriormente por “*paredes divisórias ou de compartimentação*” podem ser constituídas por alvenaria de pedra, tijolo ou de outros materiais. Nos edifícios antigos estas paredes, são designadas por “*tabiques*” e são constituídas tal como os frontais por um esqueleto de madeira, o “*fasquiado*”, aplicado sobre tábuas colocadas ao alto e posteriormente revestido em ambas as faces com reboco de argamassa de cal e saibro e por fim estuque. As paredes de tabique distinguem-se dos frontais, pois a sua espessura é inferior e consequentemente também a sua resistência mecânica.

No esquema seguinte sintetiza-se os principais tipos de paredes existentes de acordo com a natureza e características dos materiais utilizados.

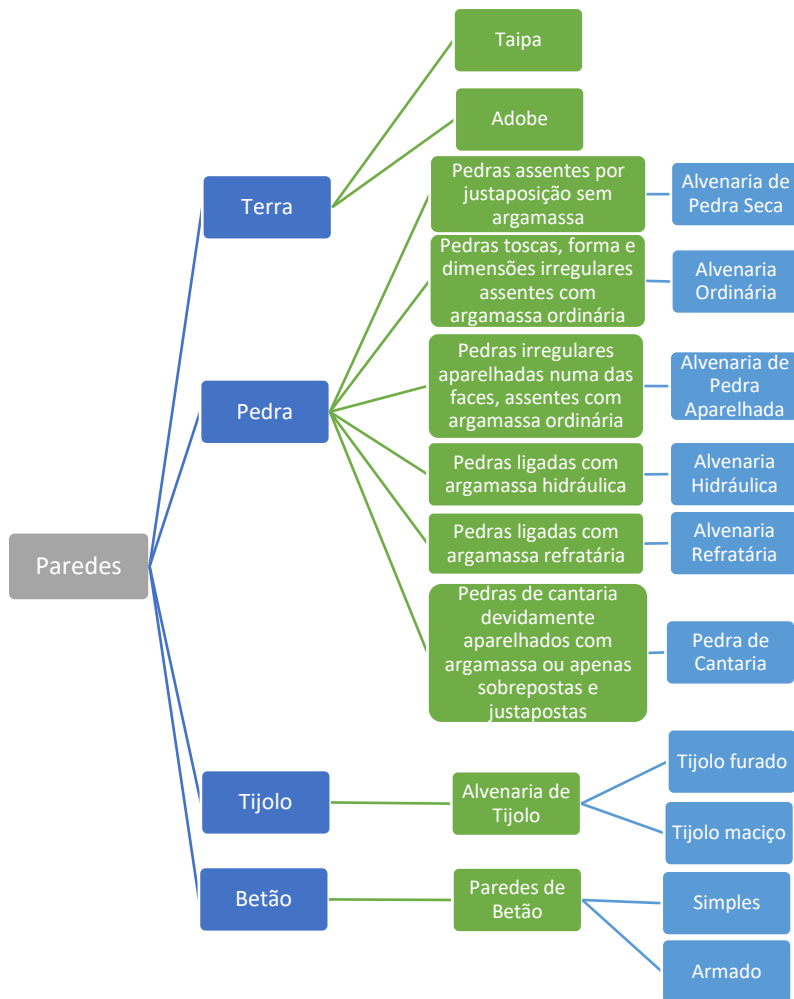


Figura 2.2 – Representação esquemática identificando as paredes de acordo com a natureza e características dos materiais utilizados  
Adaptado de (Pinho, 2000)

### 2.3 Caracterização de pavimentos de madeira

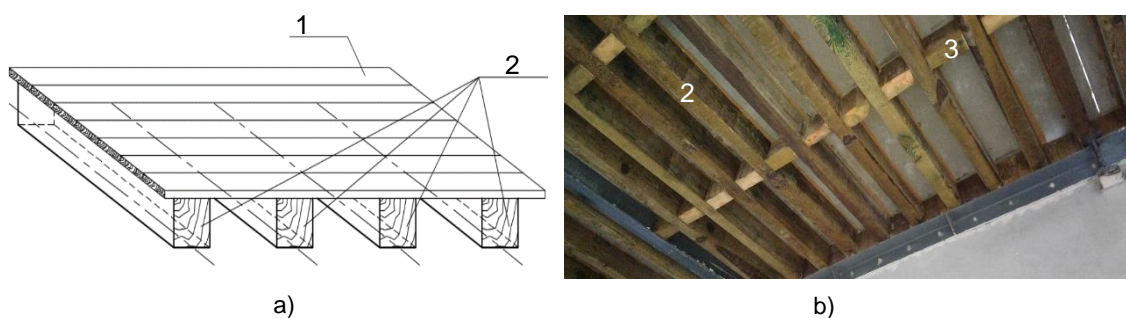
Apesar de já não se adequarem à construção atual, os pavimentos de madeira são um dos elementos característicos dos edifícios antigos. Os pavimentos são elementos horizontais responsáveis pela definição dos pisos e por garantirem o contraventamento dos elementos estruturais verticais. Estes servem de suporte dos elementos de compartimentação e ainda resistem às solicitações impostas pela própria utilização. Os pavimentos assentam sobre os elementos de maior resistência, nomeadamente as paredes-mestras, transferindo-lhes assim de forma contínua os esforços a que estão sujeitos (Moreira, 2009).

O tipo de madeira adotada na execução destes elementos dependia, geralmente do tipo de espécies locais existentes e das suas características. Das espécies de madeira frequentemente

utilizadas na construção de pavimentos destacam-se o castanho, o choupo, o cedro e o carvalho provenientes de território nacional, bem como as casquinhas da Europa Central e o *pitch-pine* da América do Norte. Menos comuns eram as madeiras de espécies exóticas provenientes do Brasil, Índia e das colónias africanas, como o pinho e o eucalipto.

Estruturalmente, os pavimentos de madeira dos pisos térreos apresentam uma constituição mais simples do que os pavimentos elevados. Os pavimentos dos pisos térreos são formados por uma camada de terra batida ou enrocamento de pedra, sobre o qual é colocado uma camada de revestimento, em ladrilho, tijoleiras cerâmicas ou em sobrados de madeira. Quanto à estrutura dos pavimentos de madeira dos pisos elevados, esta é constituída por vigamentos (barrotes de madeira) que se posicionam paralelamente entre si com um espaçamento entre vigas igual à largura das próprias vigas. Para além da estrutura vigada é realizado um tarugamento, que corresponde à colocação de elementos transversais às vigas, com o objetivo de evitar a encurvadura, a deformação transversal e a torção das mesmas (Appleton, 2003).

Os vigamentos podem ser ocultados e dar lugar a tetos trabalhados em estuque. Para tal acontecer são pregadas às vigas, ripas de madeira (fasquiado) com reduzido espaçamento, servindo como base de assentamento ao reboco e estuque de gesso (Moreira, 2009).



a) - Representação esquemática (A2P Consult); b) - Vista inferior de pavimento de madeira de edifício no Príncipe Real, Lisboa, em que: 1- Tábuas de soalho; 2- Vigas de madeira; 3- Tarugos

Figura 2.3 – Pavimento de madeira

## 2.4 Anomalias comuns em edifícios antigos

Nesta secção analisam-se as principais anomalias verificadas em paredes de alvenaria de pedra e em pavimentos de madeira. Faz-se uma breve descrição das mesmas e dos seus efeitos no comportamento estrutural dos edifícios.

### 2.4.1 Principais anomalias em paredes

As principais anomalias em paredes de edifícios antigos ocorrem quando as tensões sobre o elemento em causa excedem a resistência dos materiais em zonas significativas, devido a um aumento das ações aplicadas ou devido a uma diminuição da resistência. As anomalias podem,

em muitos casos, pôr em risco as condições de segurança dos edifícios e até mesmo causar o seu colapso (Appleton, 2003).

A probabilidade de ocorrência de anomalias encontra-se diretamente relacionada com a qualidade dos materiais utilizados, com o modo como são aplicados e com as alterações a que estão sujeitos ao longo do tempo. As anomalias têm maior possibilidade de suceder em construções em que ocorra a remoção de paredes resistentes e paredes divisórias ou em construções em que ocorra a substituição de pavimentos de madeira para pavimentos de betão. Estas situações são prejudiciais pois destas resulta um défice na distribuição das cargas que se encontravam inicialmente dimensionadas e um aumento das cargas verticais impostas ao edifício.

As anomalias frequentemente detetadas em paredes de edifícios antigos são a desagregação, o esmagamento, a fendilhação, a ação da água ou de agentes biológicos, o desconforto térmico e a degradação (Pinho, 2000, 2007). Estas anomalias estão descritas de seguida:

### **I. Desagregação**

A desagregação é uma anomalia que se verifica geralmente em paredes resistentes de edifícios antigos e deve-se à ação dos agentes climatéricos, tais como a alternância de calor e frio, que geram expansões e contrações sucessivas, ou o vento, que transporta poeiras e areias, Figura 2.4. Existem ainda outros fatores que podem contribuir para a desagregação das paredes, tais como a poluição, as humidades ou a infiltrações de diversas origens.



Figura 2.4 – Desagregação da alvenaria

### **II. Esmagamento**

O esmagamento é um fenómeno menos frequente e ocorre em zonas específicas, onde a aplicação de cargas atuantes é superior às capacidades resistentes das peças, como é o caso da descarga de vigas em paredes.

A sua ocorrência é característica em zonas de contato lateral entre vigas de madeira e a alvenaria, porque após a secagem da madeira, as vigas podem sofrer ações de torção, que originam compressões demasiado elevadas e consequente esmagamento.

### III. Fendilhação

A fendilhação é o tipo de anomalia mais corrente em paredes de edifícios antigos e o seu aparecimento tende a ocorrer em zonas sujeitas a concentrações de tensões mais elevadas. Pode ocorrer em zona corrente da parede, em zona de ligação entre paredes ortogonais ou junto dos cantos das portas e janelas.

As principais causas que contribuem para a fendilhação das paredes ao longo da sua espessura são as ações sísmicas e os assentamentos diferenciais do solo, Figura 2.5. A fendilhação junto às aberturas dos vãos, não se encontra associada a ações sísmicas, mas à resistência estrutural dos lintéis superiores que podem originar esforços de flexão excessivos e consequentes fissuras verticais.



Figura 2.5 – Fendilhação da parede em zona corrente

### IV. Desconforto térmico

As elevadas espessuras das paredes de alvenaria de pedra dos edifícios antigos, a que corresponde uma razoável resistência térmica, permitem que esta anomalia não seja tão comum, excetuando casos de menor qualidade construtiva ou de fraca ventilação. A inexistência ou falta de isolamento térmico das envolventes do edifício pode conduzir a fenómenos de condensações no interior e fendilhação em casos mais extremos. Em zonas de maior deficiência de isolamento térmico, podem surgir com o tempo manchas negras, correspondentes à formação de fungos e bolores, resultantes da condensação superficial do vapor de água nas partes mais frias das paredes (Pinho, 2000).

### V. Ação dos agentes biológicos

Esta anomalia não incide diretamente nas paredes resistentes dos edifícios antigos, mas sim na estrutura de madeira de pavimentos e cobertura, estando relacionada com a presença sazonal de humidade.

A ação de agentes biológicos surge quando há o contato da madeira com paredes sujeitas a maior humedecimento (água da chuva), despoletando assim a presença de fungos ou ataques



de insetos. Esta tem como consequências o apodrecimento da madeira e a sua degradação, Figura.2.6.



Figura 2.6 – Presença de fungos

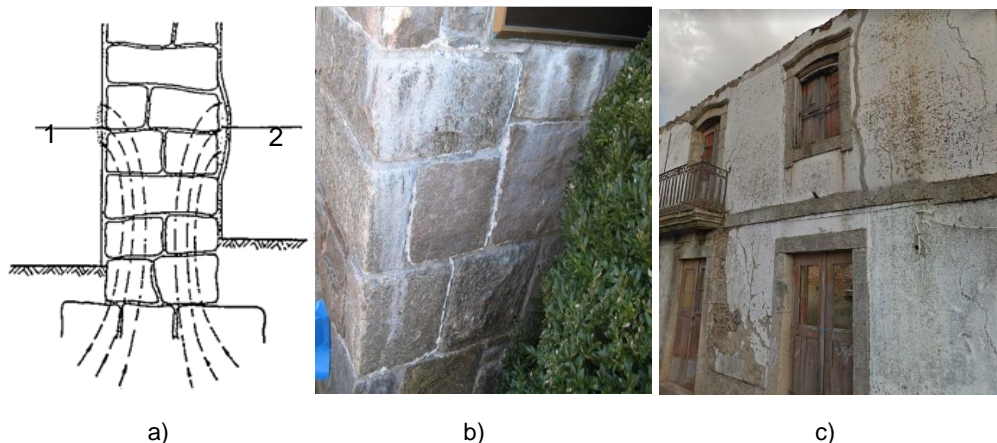
#### VI. Ação da água

A água é a principal causa da desagregação das paredes. A humidade tende a deslocar-se pelos pontos mais fracos da parede (fendas e vazios), criando uma rede de percursos preferenciais através das juntas de argamassa de assentamento da alvenaria.

A água que ascende na parede por capilaridade, ao longo do seu trajeto, vai dissolver os sais solúveis provenientes do solo, das argamassas e dos demais elementos que constituem a alvenaria. Isto altera a estrutura da parede que vai ficando cada vez mais rica com a deposição dos sais. Deste modo, quando a água evapora há a deposição dos sais de duas formas distintas: à superfície ou entre o reboco e o tosco da parede.

O depósito de sais à superfície das paredes, causado pela evaporação de água e consequente cristalização dos sais, dá-se o nome de eflorescências. Quando a cristalização ocorre no interior dos elementos, entre a parede e o revestimento de reboco, este fenómeno é denominado de criptoflorescências, Figura 2.7.

A água da chuva é uma das principais causas de desmoronamentos de edifícios antigos, devido à sua infiltração em deficientes coberturas e paredes, destruindo a fraca ligação e coesão interna da alvenaria, pondo em causa a sua resistência e a segurança dos edifícios (Pinho, 2000).



a) - Representação esquemática do mecanismo de formação de: 1-Eflorescências; 2-Criptoflorescências (Gomes,1983); b) - Eflorescência 1; c) Criptoflorescência

Figura 2.7 – Eflorescências e criptoflorescências

## VII. Degradação

A manutenção é fundamental para o bom funcionamento e durabilidade dos edifícios. Para além das anomalias anteriormente descritas, a falta de manutenção e a elevada idade dos edifícios leva à degradação dos materiais. Verifica-se assim uma série de situações, geralmente interligadas e associadas: destruição dos revestimentos e acabamentos, escorrência de águas, materiais destacados dos paramentos, fendilhação dispersa, entre outros, Figura 2.8.



Figura 2.8 – Edifícios de alvenaria de pedra degradados, Bragança

### 2.4.2 Principais anomalias em pavimentos de madeira

Neste ponto analisam-se os principais fatores que conduzem à deterioração dos pavimentos de madeira, identificam-se as anomalias habitualmente verificadas e as causas associadas à sua ocorrência. De entre as causas possíveis destacam-se as ações humanas, ações naturais e ações acidentais.

Na conceção de pavimentos de madeira, deverá ser tida em consideração a escolha adequada do material, a sua anisotropia, a pormenorização dos sistemas de ligação e as deformações



previsíveis a longo prazo, de modo a evitar anomalias tais como deformações elevadas, alteração da secção das peças e fissuração. As anomalias devido a ações humanas podem ser sintetizadas na Figura 2.9, podendo ocorrer em três fases diferentes de vida útil do pavimento (Brito, 2004).

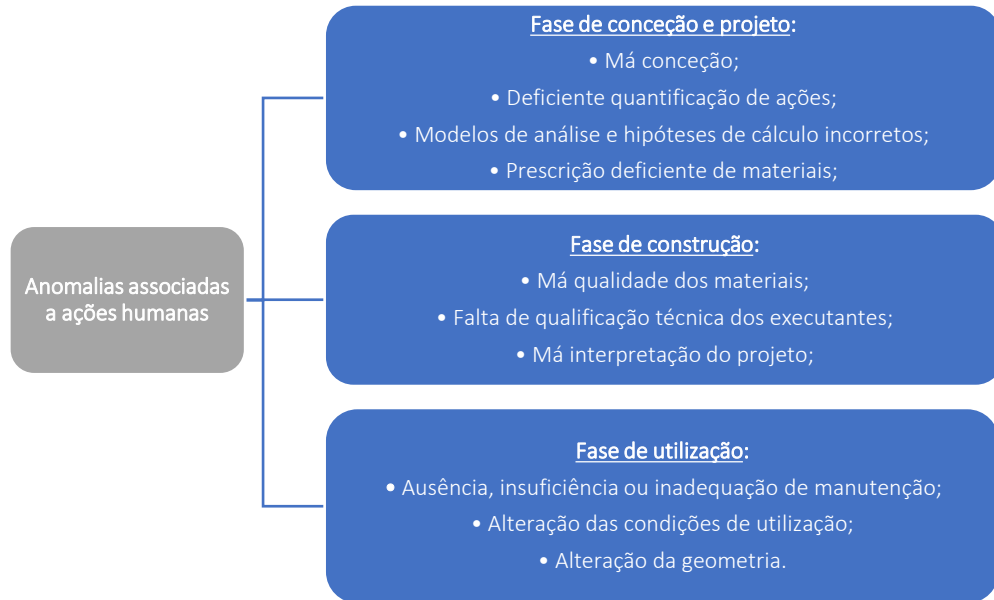


Figura 2.9 – Anomalias devido a ações humanas  
(Brito, 2004)

A exposição prolongada de elementos de madeira às condições atmosféricas, tais como luz solar e água da chuva, produzem o “envelhecimento da madeira” e alteram as suas propriedades de resistência.

Outra situação que ocorre em pavimentos de edifícios antigos, devido à sua exposição a condições de humidade e alternância de temperatura, é a presença de fungos e insetos, Figura 2.10. Tal como referido anteriormente no ponto 2.4.1, estes afetam diretamente os elementos de madeira através de aberturas existentes na alvenaria, expondo-os a condições que proporcionam a sua deterioração, diminuindo a secção útil das peças, provocando deslocamentos e redistribuição de esforços na estrutura dos pavimentos.

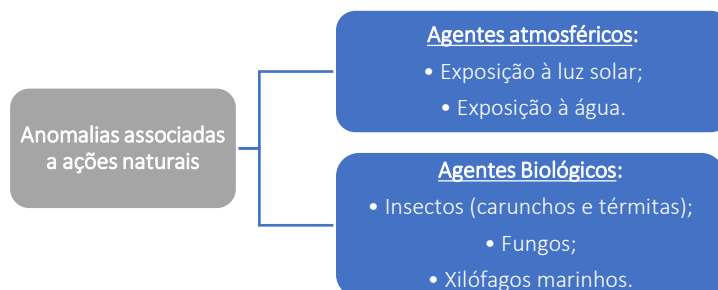


Figura 2.10 – Anomalias devido a ações naturais  
(Brito, 2004)

As anomalias causadas por ações acidentais, são muito variáveis e dependem da intensidade da origem destas, Figura 2.11. Estas ações são de caráter excepcional e podem provocar a deterioração, fendilhação, deformação e até o próprio colapso das estruturas de madeira.

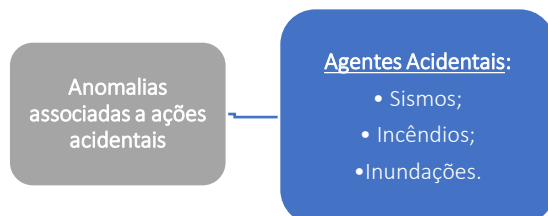


Figura 2.11 – Anomalias devido a ações acidentais  
(Brito, 2004)

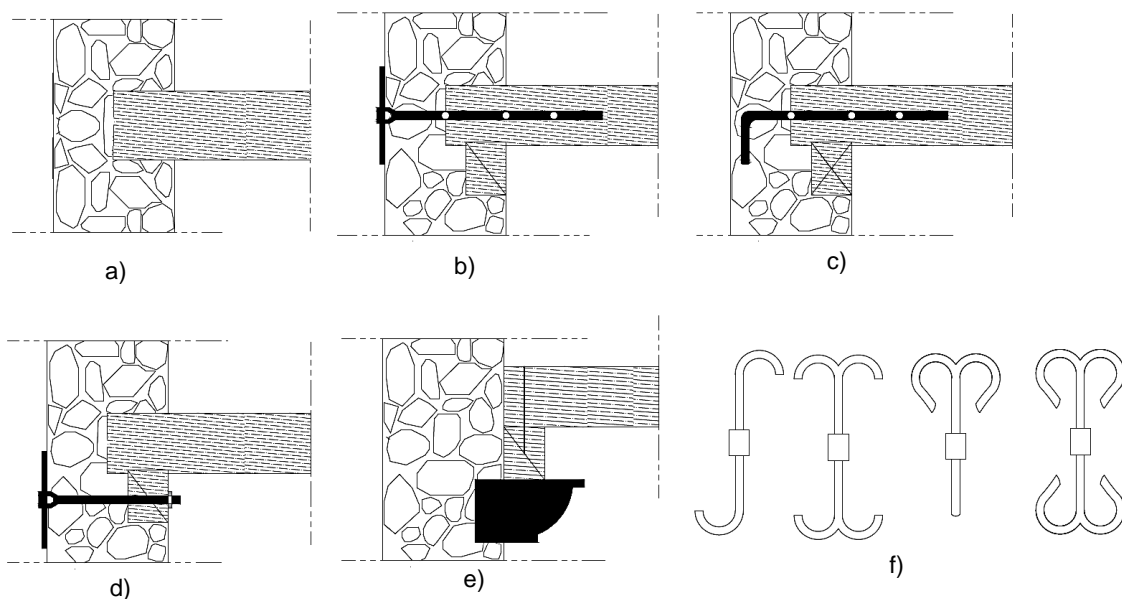
## 2.5 Principais ligações pavimento-paredes de edifícios antigos

Os tipos de ligações parede-pavimento mais utilizadas em edifícios antigos podem apresentar duas configurações, uma solução mais simples que é composta pelo encaixe das vigas de madeira em aberturas dispostas na parede, Figuras.2.12 a), ou uma mais complexa através de elementos ancorados ou encastrados na parede, Figuras.2.12 b) c) d) e) (Appleton, 2003).

No primeiro tipo de configuração, as vigas são inseridas no interior de aberturas feitas previamente nas paredes, e atravessam cerca de 20 a 25cm de comprimento para garantir uma boa estabilidade da mesma e redução de vibrações (Costa,1995).

Segundo Teixeira (2004), era habitual o apoio ser feito em toda a espessura da parede, sendo que na maior parte das situações, se verificava que esse apoio era reduzido a 2/3 da espessura da mesma. Isto deve-se ao facto de que quando apoiada na totalidade da espessura da parede, nomeadamente em paredes exteriores, a extremidade das vigas encontrava-se exposta aos agentes físicos, à humidade proveniente do exterior e à presença de agentes biológicos o que conduzia ao apodrecimento da madeira. Para evitar estas anomalias nas peças de madeira, era usual aplicar um tratamento nas extremidades das mesmas.

O segundo tipo de configuração mencionada anteriormente, recorre ao uso de ancoragens ou pregagens. Segundo Segurado (1942), era usual proceder à ligação das vigas de madeira com as paredes de alvenaria com recurso a ferrolhos. Estes são peças metálicas, de configurações variadas, que se fixam tanto às vigas como à parede, podendo ser fixadas pelo exterior (ferrolho de ligação exterior ou de "chaveta") ou pelo interior da parede (ferrolho tipo "esquadro"). Em situações em que as cargas suportadas pelo pavimento eram demasiado elevadas, usavam-se pequenos elementos de pedra ou madeira (cachorros) ou de metal encaixados no perímetro interior das paredes, onde eram assentes as vigas, de modo a que a sua área de apoio e distribuição das cargas fosse superior. Isto permitia reduzir a penetração das vigas nas paredes, reduzindo também o risco de exposição a anomalias.



a) -Viga encastrada em abertura na parede (adaptado de Appleton, 2003); b)- Viga ancorada à parede com ferrolho de ligação exterior (adaptado de Appleton, 2003); c)- Viga ancorada à parede com ferrolho tipo esquadro (adaptado de Appleton, 2003); d)- Viga apoiada em frechal ancorado à parede com ferrolho de ligação exterior (adaptado de Leitão, 1896); e)- Viga pregada a frechal apoiado em cachorro encastrado na parede (adaptado de Leitão, 1896); f)- Tipos de chavetas (em ferrolhos de ligação exterior) (adaptado de Segurado, 1942).

Figura 2.12 – Ligações pavimento-parede

## 2.6 Técnicas gerais de reforço de paredes e pavimentos

A forte dispersão geográfica de pedra no território português, conduziu a que grande parte dos edifícios antigos presentes em Portugal sejam em alvenaria de pedra. Estes edifícios assentes em paredes estruturais apresentam um fraco comportamento face a ações dinâmicas. O fraco contraventamento entre os diferentes elementos estruturais, ligação pavimento-paredes em particular, impedem o funcionamento tridimensional da estrutura, fragilizando-a face a ações sísmicas.

As intervenções em edifícios antigos de alvenaria englobam geralmente soluções de consolidação e de reforço. Na generalidade dos casos, as deficiências que impõem uma intervenção devem-se a um conjunto de causas mais ou menos complexas. É importante ter em consideração que não basta eliminar as anomalias, previamente, deverá preceder-se à eliminação das suas causas, o que implica, por vezes ações de reforço.

Considerando o verbo “reforçar”, como uma análise abrangente de possíveis soluções técnicas a aplicar, de modo a escolher aquela que menos interfere com os valores fundamentais presentes na edificação a intervir, é importante salientar este conceito pois de modo a conservar o edifício deve-se escolher o conjunto de processos e materiais mais similares aos pré-existentes

na construção a intervir. Isto possibilita uma melhor compatibilização, de forma a que haja uma correta utilização e aplicação (Appleton, 2012).

## **2.6.1 Reforço de paredes de alvenaria de pedra**

Os materiais vulgarmente utilizados em paredes de edifícios antigos, essencialmente aquelas constituídas por terra ou pedra, possuem em comum particularidades, tais como, baixa resistência à tração e corte e reduzida oposição face à impermeabilização da água através do solo ou através das argamassas utilizadas. Destas particularidades podem-se deduzir algumas técnicas de reforço nas paredes de edifícios antigos, dependentes do caso em que são aplicadas (Gómez, 2007).

De seguida apresentam-se algumas técnicas de reforço em alvenarias que têm vindo a ser utilizadas com o objetivo de melhorar as características resistentes das paredes, nomeadamente a injeção de caldas, refechamento de juntas, reboco armado, encamisamento, confinamento transversal e desmonte e reconstrução.

### **I. Injeção de caldas**

Trata-se de uma técnica de reparação, essencialmente aplicada em alvenarias de pedra, que consiste na introdução e enchimento, com calda fluída (comentícia, hidráulica ou de resinas epoxídicas), dos vazios existentes no interior das paredes ou fissuras nos paramentos exteriores. Esta introdução é efetuada através de furos previamente efetuados nas paredes, com o objetivo de preencher, os vazios ou fissuras, garantindo uma maior qualidade e uniformização da resistência da alvenaria nessa secção. Existem diferentes soluções de injeção, Figura 2.13 e Figura 2.14, que são classificadas em função de uma série de fatores, tais como, a pressão com que é aplicada a calda, o material da parede e a dimensão do vazio a colmatar (Roque,2002; Gómez, 2007).

O processo de injeção da calda é condicionado pelas condições da alvenaria, e como tal, tem um impacto direto nas características e no tipo de calda a utilizar. Após ser adotada a melhor solução de injeção a efetuar, é necessário cumprir algumas operações no suporte para que seja possível intervencionar. Destas operações fazem parte:

- A remoção do reboco ou revestimentos existentes, para que seja possível detetar possíveis fissuras à superfície, e identificar as seções a intervencionar.
- A superfície deve ser limpa, para poder ser devidamente trabalhada, evitando danificar a parede.
- Refechamento de juntas e selagem de fissuras, utilizando se possível uma calda compatível com a que será posteriormente injetada, de modo a evitar que durante a operação de injeção a calda esorra por possíveis aberturas.

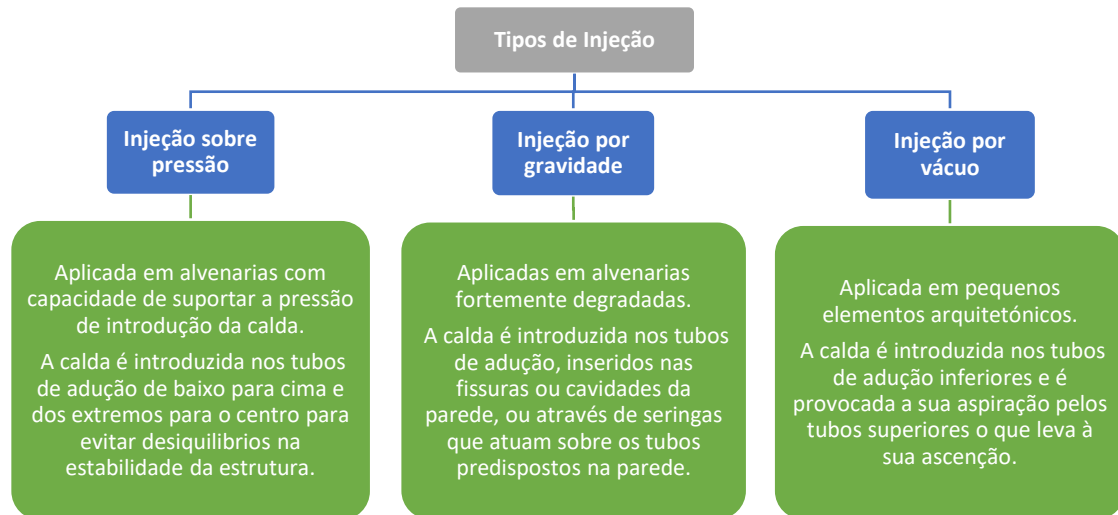


Figura 2.13 – Tipos de injeção

Adaptado de (Roque, 2002)

Após a preparação do suporte, deverá proceder-se às operações necessárias de preparação para a injeção, das quais fazem parte:

- O posicionamento e execução dos furos de injeção, que são geralmente feitos de modo a evitar ao máximo comprometer a integridade dos materiais constituintes da parede.
- Introdução de uns tubos de injeção, que servem para fazer a admissão ou escorrência da calda em excesso, nos locais onde são feitas as furações
- Injeção da calda, com o objetivo de preencher todos vazios existentes no interior da parede e de modo a aumentar a sua compacidade e a melhorar a sua resistência.

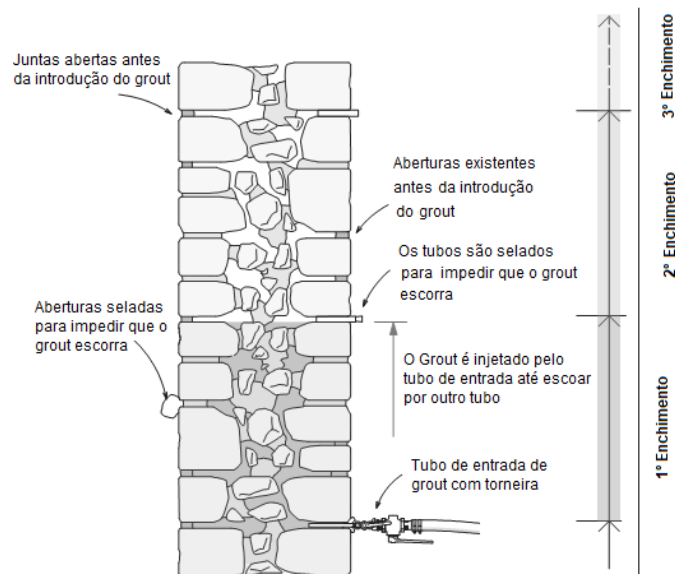


Figura 2.14 – Representação esquemática do processo de injeção por pressão

(adaptado de McCaig, 2014)

## II. Refechamento de juntas

É um método que tem o objetivo de restituir às paredes de alvenaria de pedra ou tijolo a resistência inicial colmatando as juntas de argamassa afetadas pela erosão. Isto é feito através da introdução de uma argamassa de refechamento e requer a realização de algumas operações de preparação do elemento a trabalhar, tais como:

- Remoção parcial da argamassa das juntas existentes até uma profundidade máxima de  $1/3$  da espessura total da parede.
- Limpeza das juntas com água a baixa pressão, evitando danificar o material existente.

Após a execução destas operações procede-se à reposição das juntas através de um procedimento de enchimento das mesmas por camadas, desde da sua zona interior até à superfície da parede, Figura 2.15.

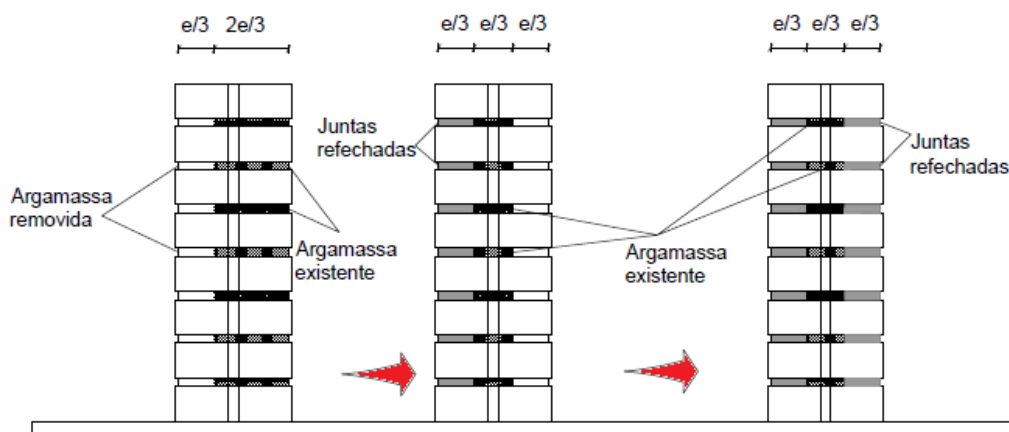


Figura 2.15 – Representação esquemática do processo de refechamento de juntas

(adaptado de Tomazevic, 1999)

## III. Reboco armado

Os rebocos armados são uma técnica aplicada em paredes que se encontram em bom estado no geral, mas com uma grande degradação a nível superficial. Como tal, o seu objetivo é promover uma melhor resistência superficial da parede à tração e ao corte, bem como controlar a fendilhação, aumentando a capacidade de absorção e dissipação de energia quando sujeita a ações sísmicas.

A execução desta técnica consiste na aplicação, sobre a parede, de uma camada de argamassa de revestimento com espessuras entre 2 a 3 cm reforçada com uma rede de armadura entre 6 a 8mm de diâmetro, fixada com recurso a pequenas pregagens, que podem em algumas situações atravessar toda a espessura da parede de modo a melhorar a conexão entre os diferentes elementos e aumentar as suas propriedades mecânicas. Atualmente existem várias soluções no mercado, entre elas fibras de vidro (GFRP), fibras de aço e malhas electrosoldadas. A argamassa a adotar pode ser de origem cementícia, sintética ou mista. Deve ter-se sempre em consideração

a escolha adequada de modo a garantir a compatibilidade entre os materiais existentes e os novos a aplicar. A aplicação da argamassa sobre a parede pode ser feita manualmente ou projetada, com recurso a equipamento específico (Azevedo, 2010).

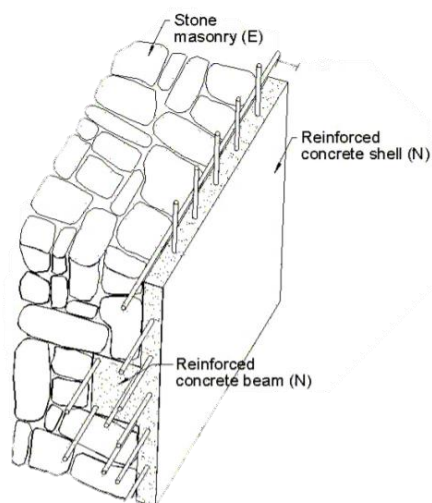


Figura 2.16 – Representação esquemática de parede de alvenaria de pedra reforçada com reboco armado  
(Foo, 2002)

#### IV. Encamisamento

Trata-se de um processo bastante semelhante à técnica do reboco armado, consiste na aplicação de uma micro-camada de betão, entre 5 a 10cm de espessura, reforçada com uma malha de aço ao longo da superfície da parede fixada através de pregagens. Esta técnica compreende a aplicação nas duas faces da parede, contendo a alvenaria no seu interior, e aumentando assim a sua secção. Destina-se a alvenarias de pedra ou tijolo, em que exista uma fraca conexão entre os materiais e que seja difícil aplicar outro tipo de procedimento de reforço pouco invasivo para proceder à sua reabilitação (Gómez, 2007).

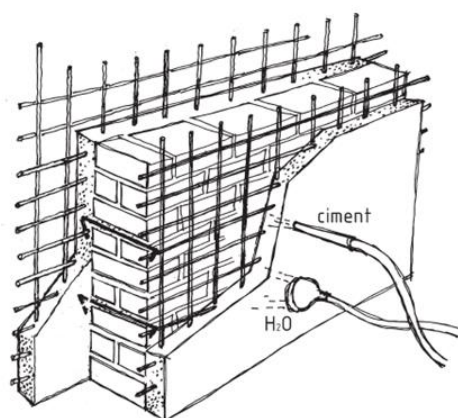


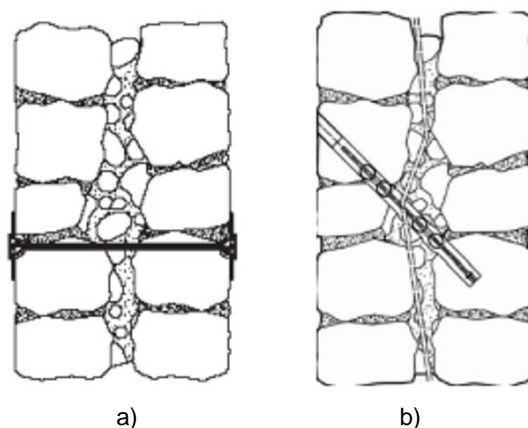
Figura 2.17 – Representação esquemática de processo de encamisamento de uma parede  
(Gómez, 2007)

## V. Conectores metálicos

Esta técnica tem como finalidade confinar a secção transversal das paredes, promovendo a sua integridade estrutural através da ligação entre os paramentos. A sua aplicação consiste na introdução de varões de aço galvanizado no interior de furos abertos transversalmente à espessura da parede, ancoradas por um sistema de placas de aço. Os furos podem ser preenchidos com *grout* de modo a potenciar a ligação dos varões à alvenaria. Após a injeção e presa, os varões são confinados através de chapas de ancoragem fixas nas suas extremidades, com o auxílio de porcas que os apertam contra a alvenaria. Esta técnica tem como objetivo melhorar o funcionamento mecânico da parede e o seu comportamento monolítico, garantindo a junção dos diferentes paramentos da parede (Pinho, 2007).

## VI. Pregagens

Tal como os conectores, as pregagens têm como objetivo garantir a união entre os diferentes elementos da parede, promovendo a sua integridade estrutural. Contrariamente à técnica dos conectores metálicos, as pregagens atravessam a completa espessura dos elementos a reforçar, e como tal o sistema de ancoragem caracteriza-se por uma única placa de aço ancorada na extremidade de uma parede (Pinho, 2007).



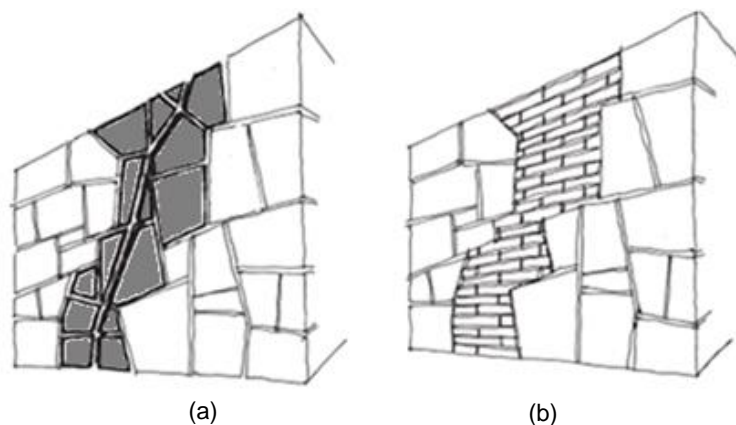
a)-Conectores; b)- Pregagens (Cóias, 2007)

Figura 2.18 – Representação esquemática de elementos de confinamento transversal

## VII. Desmonte e reconstrução

Consiste na retirada do material da seção afetada da parede e da posterior reconstrução da mesma área com recurso ao mesmo material ou a outros com características resistentes e de deformabilidade similares, Figura 2.19. Em paredes de alvenaria de pedra ou tijolo é habitual reutilizar os mesmos materiais na substituição. Em todos os casos o objetivo da intervenção passa por reparar ou substituir os componentes degradados tentando restaurar a capacidade resistente que o elemento possuía inicialmente (Azevedo, 2010).





a)-Desmonte da alvenaria; b)- Substituição por outra. (Gómez, 2007)

Figura 2.19 – Representação esquemática do processo de desmonte e reconstrução

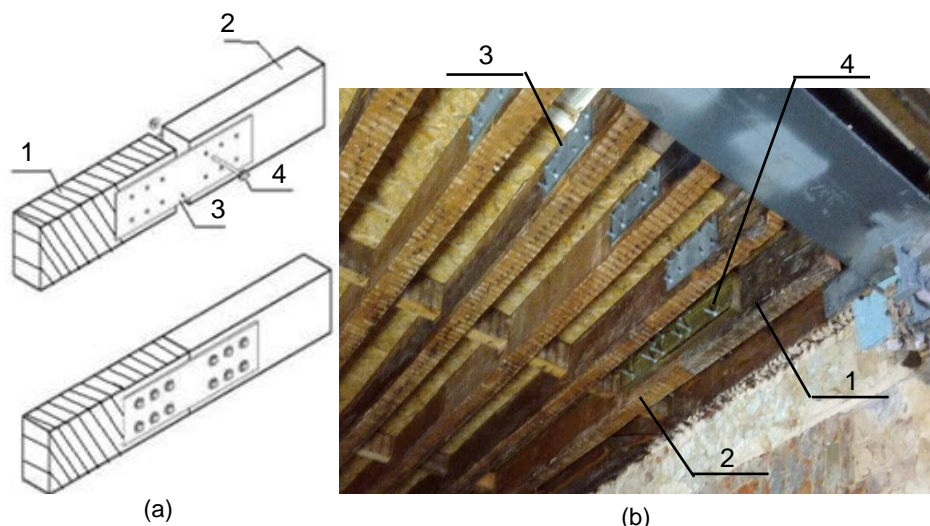
### 2.6.2 Reforço de pavimentos de madeira

As intervenções em pavimentos de madeira, devem fundamentar-se no diagnóstico prévio das causas das anomalias detetadas, sejam elas originadas por agentes biológicos, deformação da própria madeira ou por o próprio dimensionamento não ter sido corretamente feito para as cargas que recebe. A escolha da intervenção de reforço a adotar requer conhecimento das condições de uso futuro e da necessidade de conservação.

Algumas das técnicas e métodos de intervenção de reforço aplicados em pavimentos de edifícios antigos são a substituição de parte ou totalidade dos seus elementos de madeira, o aumento da seção desses elementos e a adição de lajeta de betão armado. De seguida descreve-se cada uma das técnicas.

#### I. Substituição de parte ou totalidade de elementos de madeira

Os ataques de fungos e térmitas concentram-se frequentemente nos apoios das vigas e vigotas de madeira, especialmente em elementos em contato direto com paredes exteriores, devido às condições de humidade que ocorrem. Nestes casos é necessário proceder à substituição das zonas afetadas e substituir por peças novas de madeira. Para se proceder à substituição há que ter em atenção uma série de operações, tal como, o escoramento da estrutura a intervir, de modo a proceder ao corte e remoção da zona danificada sem haver o risco de colapso do elemento. Quando efetuada a substituição da zona afetada, a ligação entre o elemento antigo e o elemento novo pode ser reforçada e conectada por elementos metálicos, como por exemplo chapas fixadas mecanicamente entre si com recurso a parafusos de aço (Gómez, 2007).



(a)- Representação esquemática de ligação entre peças de madeira – adaptada de (Dias, 2008);  
 (b)- Substituição e aplicação de novas peças, edifício no Príncipe Real, Lisboa.

Em que: 1- Peça antiga; 2- Peça nova; 3- Chapa de aço; 4- Parafusos.

Figura 2.20 – Ligação entre peças de madeira com chapa de aço e parafusos

## II. Aumento da secção dos elementos

Este tipo de técnica aplica-se em situações que se verifiquem deformações excessivas ou roturas locais nos elementos do pavimento. Pode estar associada a diferentes tipos de anomalias, nomeadamente, ataque de agentes biológicos e decréscimo da capacidade de carga devido a defeitos na peça.

A insuficiente secção das peças de madeira pode estar associada também à imposição de ações de carga para as quais não estariam dimensionadas, fazendo deste modo reduzir as suas características resistentes. Para resolver esta situação, utilizam-se novas peças que se ligam com as originalmente existentes, aumentando assim a sua secção transversal. Nem sempre é possível aplicar esta técnica, devido ao excesso de deformação das peças originais. O aumento da secção é realizado pelo aparafusamento ou pregagem dos elementos novos aos originais, Figura 2.22, um pouco à semelhança do que é feito com a substituição de parte dos elementos de madeira descritos anteriormente (Costa, 2009).

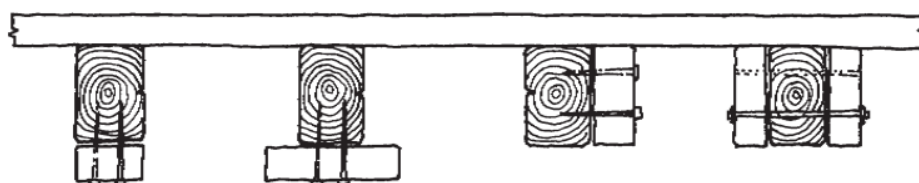


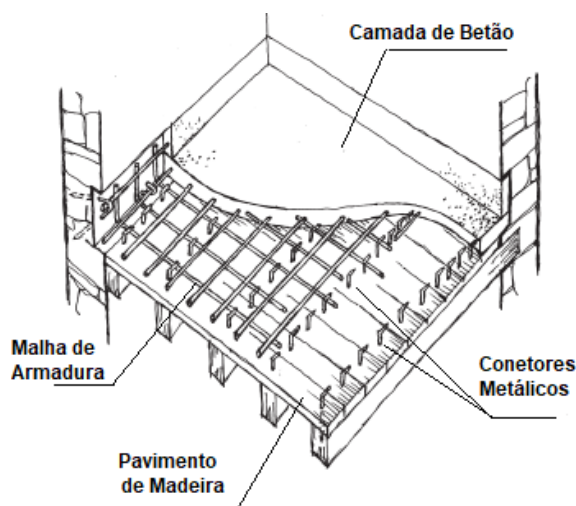
Figura 2.21 – Representação esquemática de aumento da secção transversal de uma viga de madeira  
 (Arriaga, 2002)

### III. Adição de laje de betão armado

A aplicação de uma camada de betão sobre o pavimento de madeira existente, é uma das técnicas mais utilizadas em soluções de intervenção atualmente. Esta técnica de reforço em pavimentos baseia-se na transformação das vigas de madeira existentes, em vigas mistas de madeira e betão, atribuindo-lhes uma capacidade de distribuição das tensões de flexão uniforme em todas as direções do pavimento, Figura 2.23. Quando ligado às paredes exteriores do pavimento promove um aumento da rigidez global do edifício e melhora o seu comportamento às ações sísmicas (Costa, 2009).

Para proceder à aplicação desta técnica é necessário adotar as seguintes operações:

- i. Escoramento do pavimento para aplicação da camada de betão, visto que existe um aumento da carga.
- ii. Impedir que as peças de madeira absorvam água do processo de betonagem, para tal deverá introduzir-se telas para fazer a sua separação.
- iii. Introduzir conetores metálicos para garantir uma maior aderência dos elementos de madeira à nova camada de betão.
- iv. Introdução de armadura sobre o pavimento, que posteriormente será envolvida por betão.
- v. Betonagem da camada



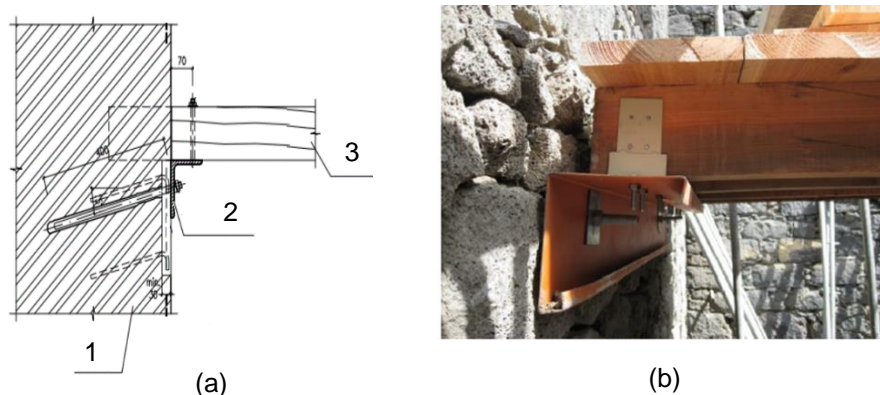
(a)- Representação esquemática de laje reforçada com betão armado; (b)- Aplicação de camada de betão sobre pavimento de madeira <sup>2</sup>.

Figura 2.22 – Reforço de pavimento com adição de laje de betão armado

<sup>2</sup> Imagem de [laterlite.com/applications/building/slab-strengthening/](http://laterlite.com/applications/building/slab-strengthening/)

### 2.6.3 Reforço de ligações parede-pavimento

Para reforço de ligações parede-pavimento, optou-se por abordar uma técnica de reforço usada no trabalho experimental desta dissertação, a técnica da introdução de uma cantoneira metálica. Esta consiste na fixação de uma cantoneira metálica ao longo do perímetro interior da parede, e tem como objetivo melhorar a distribuição das cargas por uma superfície maior, aumentando a capacidade resistente das ligações, Figura 2.23. Trata-se de uma solução de fácil execução, feita por intermédio de parafusos, contudo é necessário ter em conta certas medidas, de modo a garantir o seu eficiente funcionamento. É necessário avaliar qual a profundidade adequada à fixação dos parafusos, tal como o sistema de fixação a adotar e regularizar a superfície da parede onde a cantoneira encosta de forma a garantir uma distribuição de esforços uniforme (Ferreira, 2009).



(a)-Representação esquemática de cantoneira metálica fixa à parede por pregagens (A2P Consult), em que: 1- Parede de alvenaria; 2- Cantoneira metálica em L; 3- Viga de pavimento; (b)-Fixação de cantoneira a parede de alvenaria (Arêde, 2016);

Figura 2.23 – Reforço da ligação pavimento-parede com recurso a cantoneira metálica

# Capítulo 3

## Trabalhos experimentais de outros autores

### 3.1 Considerações iniciais

No presente capítulo, são referenciados alguns trabalhos experimentais desenvolvidos por diferentes autores ao longo dos últimos anos dentro da temática desta dissertação.

Numa primeira fase referenciam-se dois trabalhos experimentais inseridos no estudo das ligações pavimento-parede, realizados na Universidade do Minho (UM). Após o referido, apresentam-se um conjunto de trabalhos desenvolvidos na FCT-UNL, que se enquadram numa linha de investigação iniciada em 2013, e da qual faz parte a presente dissertação. Nesta linha de investigação, são usados modelos experimentais de alvenaria de pedra (muretes), desenvolvidos com os mesmos materiais, proporções e processos construtivos que os descritos em Pinho (2007) e por esse motivo é feita uma breve descrição dos mesmos. Os trabalhos referidos encontram-se apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Trabalhos experimentais analisados

Ano	Autores	Instituições	Trabalhos experimentais
2014	S. Moreira, L. F. Ramos, D. V. Oliveira, P. B. Lourenço, L. Mateus (a)	UM	Desenvolvimento de uma solução para adaptação a reforço sísmico das ligações parede/pavimento em edifícios de alvenaria não reforçada com diafragmas em madeira
2014	S. Moreira, L. F. Ramos, D. V. Oliveira, P. B. Lourenço (b)		Desempenho experimental das ligações alvenaria/madeira reforçadas com ancoragens injetadas
2014	S.A. Martins	FCT-UNL	Ligações pavimento/parede com pregagens para reabilitação de edifícios antigos
2015	L.A. Simões		Ligação pavimentos/paredes de edifícios antigos. Ensaio e verificações de projeto
2016	C.S. Justiniano		Ligação por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria reforçadas
2016	V.C. Hritiu		Análise experimental da ligação por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria de pedra tradicional

### 3.2 Trabalhos experimentais inseridos no tema das ligações pavimento-paredes

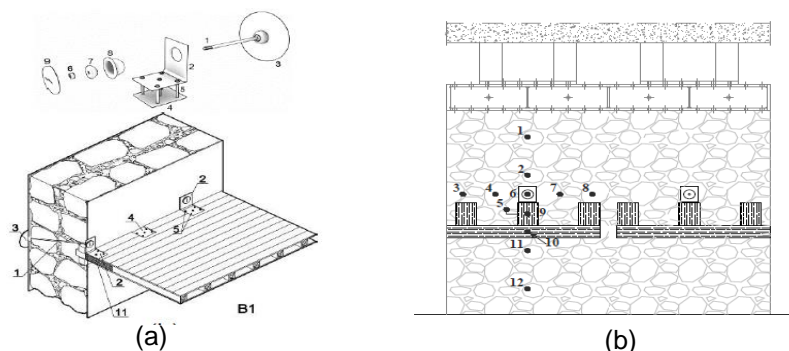
#### 3.2.1 Trabalho de S. Moreira, et al (2014) a)

No trabalho de Moreira (2014) (a), “Desenvolvimento de uma solução para adaptação a reforço sísmico das ligações parede/pavimento em edifícios de alvenaria não reforçada com diafragmas em madeira”, faz-se uma caracterização experimental do comportamento da ligação parede/pavimento existente em edifícios de alvenaria não reforçada com diafragmas de madeira, através da utilização de uma solução adaptada para melhorar o seu desempenho sísmico.

A solução consiste na fixação de uma cantoneira metálica a uma parede de alvenaria, com recurso a um sistema de ancoragem constituído por uma placa de ancoragem e um tirante. Por sua vez a cantoneira é fixa a uma viga de madeira, embutida na parede e assente num frechal, como descrito na figura 3.1.a). Para se proceder à avaliação do desempenho desta solução, foram construídos modelos experimentais que posteriormente foram ensaiados ao arrancamento monotónico e cíclico. A diferença entre ambos assenta na velocidades e amplitude em que são aplicados. Os modelos (paredes) construídos apresentavam as seguintes dimensões 2,0m x 1,6m x (0,4m ou 0,6) (altura, comprimento x largura), e são constituídos por alvenaria de pedra calcária com uma dimensão máxima 0,2m.

Durante os ensaios pretende-se testar o comportamento da solução a dois níveis distintos, um piso elevado e um piso térreo. Desta forma, aplicou-se às paredes com 0,4m de espessura uma pré-carga de 0,2MPa e às de 0,6m de espessura uma pré-carga de 0,4MPa. Em cada parede foram instaladas duas ligações. Os tirantes utilizados eram de aço de alta qualidade (classe 8.8), tinham 16mm de diâmetro e foram aplicados com uma inclinação de 15° com a horizontal. No total foram realizados quatro modelos de ensaio, dois para cada espessura.

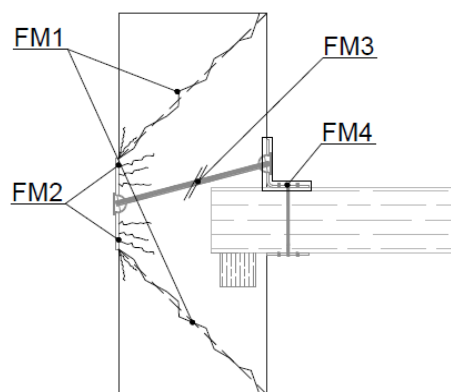
Para registar os deslocamentos efetuados pela ligação durante o procedimento experimental, foi instalado um conjunto de LVDT (Linear Variable Differential Transformer) nas zonas envolventes à solução de reforço e extensómetros nos tirantes, Figura 3.1 b).



(a)- Solução de reforço adotada; (b)- Disposição espacial das ligações

Figura 3.1 – Representações esquemáticas da ligação pavimento-parede

Definiram-se ainda alguns modos de rotura expectáveis do comportamento da ligação quando submetida a ensaio, que são apresentados na Figura 3.2.



FM1 – Rotura de cone de alvenaria;

FM2 – Esmagamento da alvenaria sob a placa de ancoragem;

FM3- Plastificação e cedência do tirante;

FM4 – Falha da ligação entre a cantoneira e a viga de madeira.

Figura 3.2 – Modos de rotura da ligação

Os resultados obtidos dos 8 ensaios de arrancamento monotónicos são apresentados na Tabela 3.2, e correspondem à força máxima de arrancamento aplicada e ao deslocamento da ligação pavimento/parede.

Tabela 3.2 – Resultados obtidos dos ensaios de arrancamento

Modelo	Força de arrancamento (kN)	Deslocamento da ligação (mm)
WF.40.A.3A	93.09	81.08
WF.40.A.3B	105.38	60.11
WF.40.A.4A	94.50	84.32
WF.40.A.4B	94.07	58.75
<b>Média</b>	<b>96.76</b>	<b>71.07</b>
WF.60.A.2B	92.42	60.31
WF.60.A.3A	82.67	37.57
WF.60.A.3B	102.44	104.19
WF.60.A.4B	90.02	59.19
<b>Média</b>	<b>91.89</b>	<b>65.32</b>

Dos ensaios de arrancamento realizados, foi possível analisar o comportamento da solução de ligação parede/pavimento adoptada, e avaliar os modos de rotura mais frequentes para cada espessura de parede. Para as paredes de 0,4m, observou-se que os modos de rotura mais incidentes foram (FM1+FM4), isto é, a combinação de rotura de cone de alvenaria associada a uma falha na ligação entre a cantoneira e a viga de madeira. Por outro lado, para as paredes de 0,6m, os modos registados foram (FM3 e FM4), isto é, a plastificação e cedência do tirante e a



falha da ligação entre a cantoneira e a viga de madeira. A capacidade de carga média obtida dos dois modelos ensaiados foi idêntica, e como tal não é possível obter uma relação da influência da variação de espessura e de pré-cargas aplicadas a partir dos resultados obtidos.

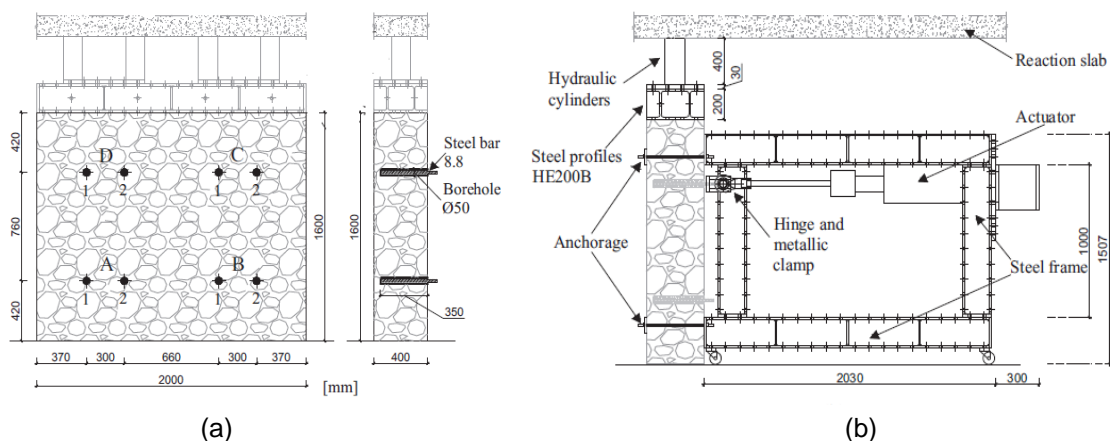
### 3.2.2 Trabalho de S. Moreira, et al (2014) b)

O trabalho de Moreira (2014) (b), “Desempenho experimental das ligações alvenaria/madeira reforçadas com ancoragens injetadas”, à semelhança do anterior, possui o objetivo de avaliar o comportamento das ligações de paredes de alvenaria de pedra com estruturas de madeira (pavimento ou paredes), mas desta vez quando estas são reforçadas com mangas injetáveis.

Para proceder a essa avaliação, foram construídas duas paredes de alvenaria de pedra calcária irregular, com um traço de (1:3:10:6) (cimento, cal hidráulica, areia de rio, areia amarela), e dimensões 2,0x1,6x0,4 m<sup>3</sup> (altura, comprimento, largura). Após 28 dias da construção das paredes, estas foram carregadas com uma pré-carga equivalente a uma tensão de 0,2 MPa de modo a simular o carregamento real a que as paredes estão sujeitas nos edifícios.

No total foram realizados oito ensaios, quatro em cada parede, em zonas distintas (A, B, C, D) como se pode observar na figura 3.3 a). Em cada zona foram realizadas duas furações onde posteriormente foram inseridos varões de aço e injetados com *grout*. As furações apresentavam 50mm de diâmetro, 350mm de profundidade e distavam entre si de 300mm.

O diâmetro dos varões de aço utilizados em cada parede é variável, no modelo de parede WT.40.I.1 foram usados varões com 20mm de diâmetro e no modelo WT.40.I.2 varões com 16mm de diâmetro. O *grout* usado no sistema de ancoragem apresenta, aos 28 dias, uma resistência à tração de 4,5MPa e uma resistência à compressão de 51,5MPa.



(a)- Distinção das diferentes zonas de pregagens do modelo experimental; (b) - Sistema de ensaio para ensaios de arrancamento

Figura 3.3 – Representação esquemática do modelo experimental e sistema de ensaio

(Moreira, S. et al,2014)



O sistema de ensaio, representado na Figura 3.3 b), tem como função a aplicação de uma tensão de arrancamento. Esta tensão aplica-se perpendicular à parede, em cada par de escoras ao mesmo tempo. O arrancamento é feito com recurso a um grampo metálico situado na extremidade do braço de atuação.

Foram realizados ensaios de arrancamento monotónico e cíclico. Para os ensaios realizados às duas paredes obtiveram-se os valores de força máxima aplicada na ligação representados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados obtidos dos ensaios de arrancamento

Modelo	Tipo de arrancamento	Força máxima de arrancamento (kN)	Deslocamento da ligação (mm)
WT.40.I.1A	Cíclico	111,7	5.93
WT.40.I.2A	Cíclico	107,2	8.52
WT.40.I.2B	Cíclico	104,9	10.21
<b>Média nível inferior</b>		107,9	
WT.40.I.1C	Monotónico	76,8	9.16
WT.40.I.2C	Cíclico	75,0	7.73
WT.40.I.1D	Cíclico	81,2	3.94
WT.40.I.2D	Monotónico	74,3	7.03
<b>Média nível superior</b>		76,8	

Observando os resultados apresentados da força máxima de arrancamento aplicada, conclui-se que existe uma diferença relativa entre os valores obtidos na ligação superior e inferior. Os resultados correspondentes às pregagens superiores, C e D, apresentam um valor médio de 76,8 kN e as pregagens inferiores, A e B, um valor de 107,9 kN. Existe uma diferença carga de cerca de 30% entre cada nível.

Devido à força exercida durante o ensaio, ao nível inferior, verificou-se uma combinação dos modos de rotura observados caracterizados pela rotura de cone de alvenaria e pela interface alvenaria/*grout*. Ao nível superior, a força exercida na ligação foi inferior, verificando-se a sua rotura pela formação de um cone de alvenaria, Figura 3.2.

### 3.3 Trabalhos experimentais dentro da mesma linha de investigação

Neste ponto são referidos os trabalhos experimentais desenvolvidos na FCT-UNL, dentro da temática da presente dissertação. Este conjunto de trabalhos fazem parte de uma linha de investigação, iniciada em 2013, com o objetivo de avaliar a capacidade de carga das ligações

pavimento-parede a cargas verticais, a resistência à compressão axial e a profundidade de carbonatação de modelos experimentais em alvenaria (muretes), simples e reforçados.

Os modelos experimentais utilizados nestes trabalhos, fazem parte de uma segunda série de muretes construídos após a tese de doutoramento de Pinho (2007), mas em que se utilizou os mesmos materiais, proporções e métodos construtivos que os descritos nessa tese.

Os modelos experimentais pertencentes à primeira série construída por Pinho em 2002, e apresentados em Pinho (2007), são constituídos por 75% de alvenaria de pedra calcária e 25% de argamassa de assentamento de cal aérea hidratada. A pedra calcária usada apresentava uma dimensão máxima de 25cm e uma resistência mecânica média à compressão de 47,75 MPa. A argamassa de assentamento foi produzida a um traço volumétrico de (1:3), sendo uma parte de cal aérea hidratada e três partes de areia, distribuídas igualmente por areia de rio e de areeiro. A relação A/L (Água/Ligante) é de 2.4/2.0=1,2. Os valores médios obtidos aos 90 dias para o módulo de elasticidade dinâmico, resistência à flexão e resistência à compressão da argamassa de assentamento são respetivamente, 2310 MPa, 0,30 MPa e 0,65MPa.

Dos muretes ensaiados por Pinho (2007), destacam-se os simples ou de referência, M43, M21 e M32, Figura 3.4. Os valores da tensão de compressão axial obtidos para estes muretes, encontram-se apresentados na Tabela 3.4. Foram desenvolvidos outros modelos experimentais em que se aplicaram e testaram algumas soluções de reforço, nomeadamente, conectores metálicos transversais, lâminas de microbetão e reboco de argamassa bastarda armado com malha de fibra de vidro.

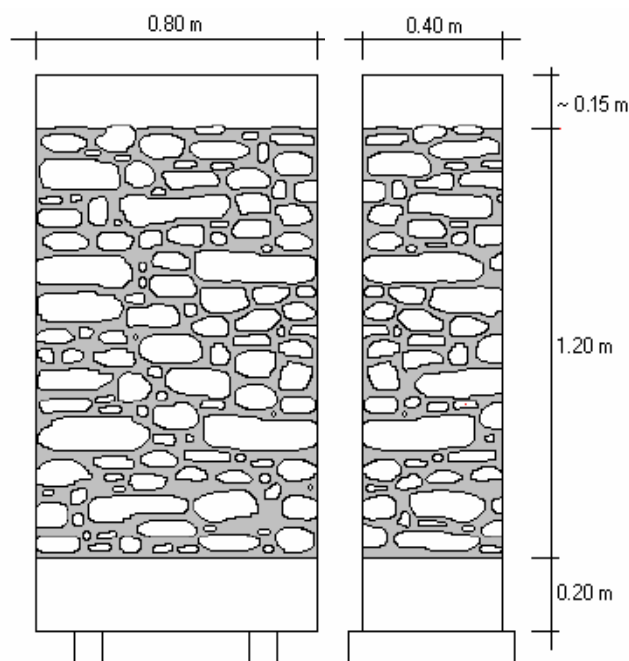


Figura 3.4 – Representação esquemática de modelo experimental simples (M43, M21 e M32)

(Pinho,2007)

Tabela 3.4 – Resultados do ensaio de compressão axial dos muretes de referência

Muretes de referência		M43	M21	M32
$\sigma_{rot}$	MPa	0,42	0,40	0,46
Média		0,43		

### 3.3.1 Trabalho de S. Martins (2014)

No trabalho de S. Martins, “Ligações parede/pavimento com pregagens para reabilitação de edifícios antigos”, foram utilizados dois muretes M211 e M215, pertencente à segunda série referida anteriormente. Os muretes foram submetidos a dois ensaios experimentais. O primeiro ensaio consistiu em avaliar a capacidade de carga de uma ligação pavimento/parede, simulada pela fixação de uma cantoneira ao murete com o auxílio de pregagens e o segundo consistiu em determinar a resistência à compressão do murete, e posteriormente avaliar o seu grau de carbonatação.

Para fixação da cantoneira, foram realizadas três furações a meia altura da alvenaria com 16mm de diâmetro, 300mm de profundidade e uma inclinação de 15° com a horizontal. Posteriormente, foram inseridos nos furos varões roscados com 12mm de diâmetro e procedeu-se à injeção dos mesmos por gravidade com *grout* (SikagROUT®-213). A superfície do murete foi regularizada com gesso para posteriormente ser efetuado o posicionamento da cantoneira de ensaio, como mostra a Figura 3.5.

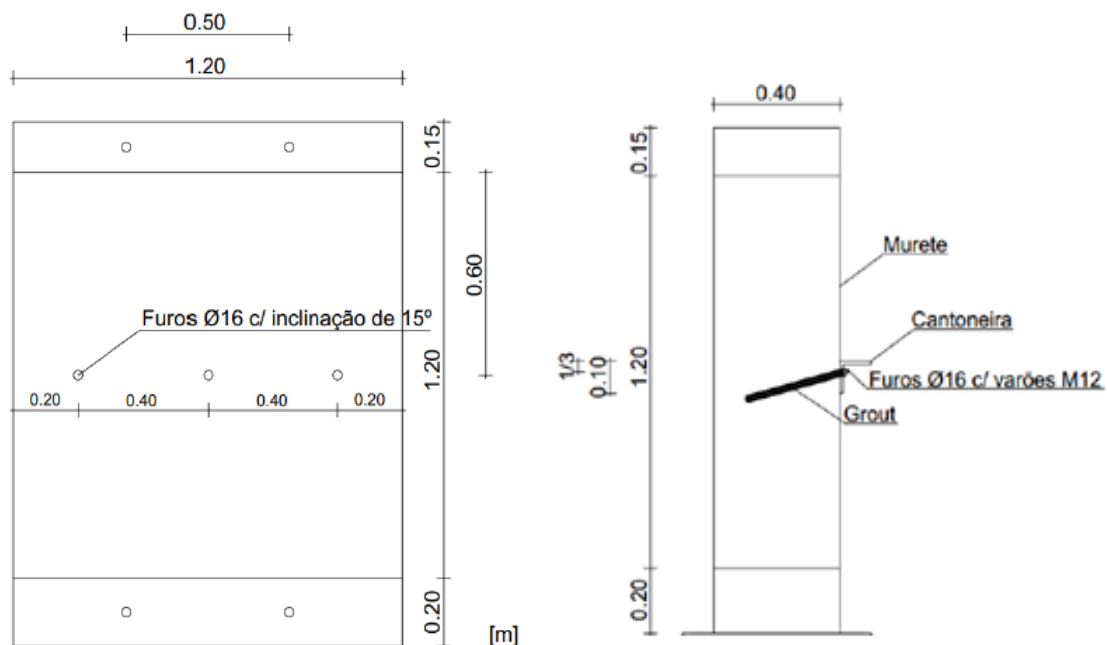
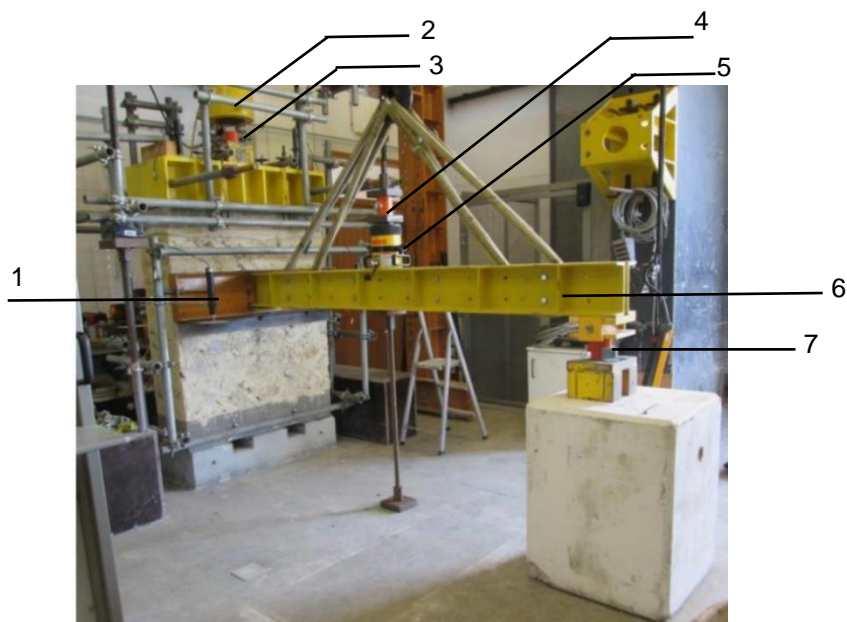


Figura 3.5 – Representação esquemática do posicionamento dos furos e da cantoneira

(Martins,2014)

Sobre a cantoneira foram colocadas duas vigas metálicas, uma longitudinal e outra perpendicular. A viga longitudinal (perfil UPN300), de maior rigidez que a cantoneira, tem como função distribuir uniformemente as cargas aplicadas pela viga perpendicular (2\*UPN220) que simula o pavimento. O sistema de ensaio é representado na Figura 3.6.



1-Viga longitudinal; 2- Cilindro hidráulico; 3-Célula de carga CC1; 4- Célula de carga CC2; 5- Cilindro hidráulico; 6-Viga perpendicular; 7-Célula de carga CC3

Figura 3.6 – Aspeto geral do sistema de ensaio

(Martins, 2014)

Da realização do ensaio da ligação pavimento/parede ao murete M215 obteve-se os valores registados nas células de carga CC2 e CC3, correspondentes à força máxima aplicada na cantoneira, Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados obtidos do ensaio das ligações

Ensaio Ligação pavimento/parede Murete M215	CC2 (kN)	CC3 (kN)	Força máxima aplicada na cantoneira (kN)
Carregamento	28,0	14,1	15,8
1º Recarga	24,9	12,5	14,2
2º Recarga	22,7	11,3	13,3

Da realização do ensaio de compressão axial obteve-se os valores correspondentes às tensões e deformações máximas a que os muretes foram sujeitos, Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Resultados obtidos dos ensaios de compressão axial

Ensaio Compressão axial	Força máxima (kN)	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação máxima (‰)
Murete M215	219,5	0,46	9,4	7,8
Murete M211	211,0	0,44	8,5	7,1
Média	215,3	0,45	8,9	7,5

Procedeu-se por fim à determinação da profundidade de carbonatação dos muretes usando uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,5% e uma fita métrica. Caso a profundidade de carbonatação atingisse os 200mm, valor correspondente a metade da espessura do murete, isto significaria que o mesmo se encontrava totalmente carbonatado. Obteve-se as seguintes medições apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Profundidade de carbonatação média

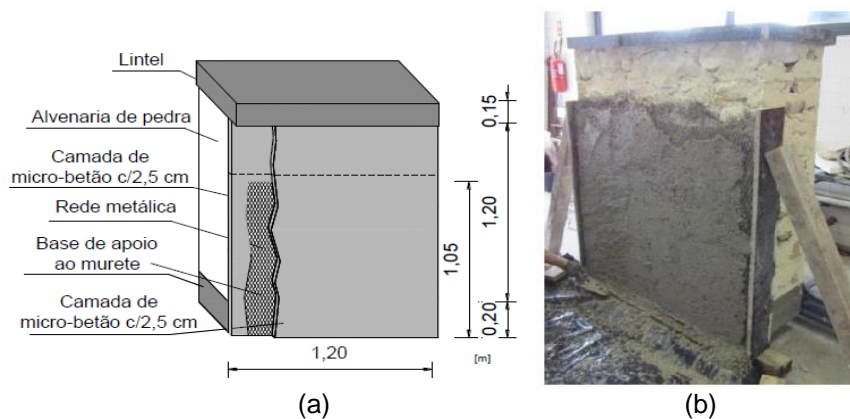
Muretes	Profundidade de carbonatação média (mm)	Profundidade de carbonatação média (%)
M215	72,5	36,3
M216 <sup>1</sup>	81,0	40,5
M211	85,0	42,5

### 3.3.2 Trabalho de L. Simões (2015)

No presente trabalho de investigação “Ligação pavimentos/parede de edifícios antigos. Ensaios e verificações de projeto” foram utilizados dois muretes M209 e M213, construídos em 2010. Os muretes foram submetidos a dois ensaios experimentais. O primeiro consistiu em observar o comportamento de uma ligação pavimento/parede, simulada pela fixação de uma cantoneira ao murete com o auxílio de pregagens. Inicialmente a cantoneira foi colocada a meia altura da alvenaria de pedra, a 0,60m da base de apoio do murete e posteriormente a  $\frac{1}{4}$  da altura da alvenaria de pedra, a 0,30m da base de apoio do murete. O segundo ensaio experimental realizado consistiu na determinação da resistência dos muretes à compressão axial. Por fim, avaliou-se a profundidade de carbonatação de ambos.

Antes dos ensaios, foram realizados uma série de procedimentos para preparação dos muretes. O murete M213 foi reforçado, na superfície frontal, com duas lâminas de microbetão de 2,5cm intercaladas com uma rede metálica de 1,05m de altura e 1,2m de largura, como mostra o esquema da Figura 3.7. A composição do microbetão foi a mesma usada nos muretes de Pinho (2007).

<sup>1</sup> O murete M216 ficou inutilizado durante os ensaios, sendo que a profundidade de carbonatação foi único valor que se conseguiu obter.

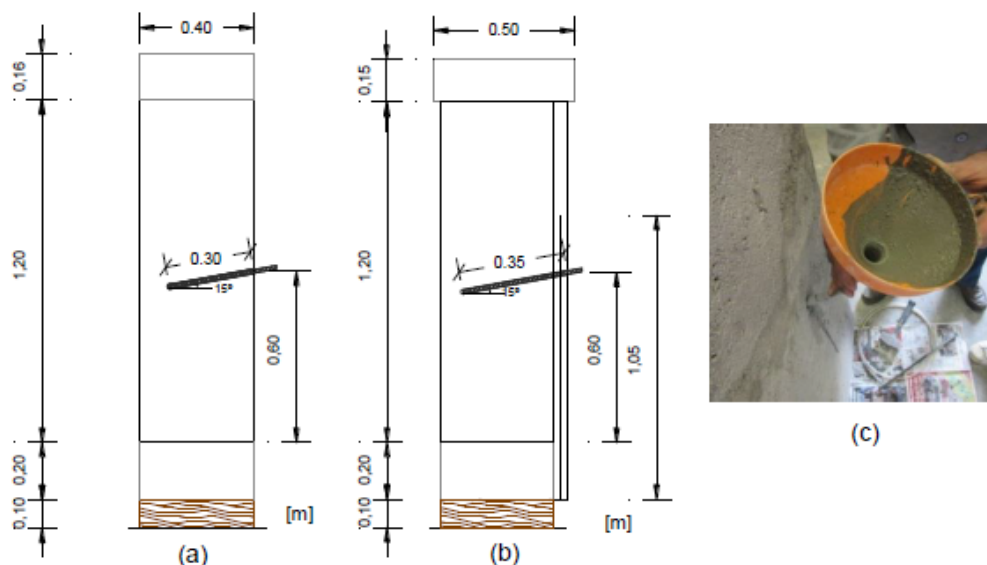


a) -Esquema do sistema estrutural do murete; (b)-Execução da camada de microbetão

Figura 3.7 – Modelo experimental (murete) M213

(Simões,2015)

Os muretes ensaiados não possuíam lintel, e por isso foi necessário a colocação de um lintel pré-existente, para dispor uma distribuição uniforme das cargas verticais aplicadas no murete. Para posicionar a cantoneira tanto a metade como a  $\frac{1}{4}$  da altura da alvenaria, foi necessário fazer 3 furos com 16mm de diâmetro e 300mm de profundidade no murete M209 e 3 furos com 350mm de profundidade no murete M213, visto este possuir maior espessura. Estes furos tinham uma inclinação aproximada de  $15^\circ$ , para garantir que a aderência dos varões à alvenaria era feita através de um *grout* por ação da gravidade como mostra a Figura 3.8 c).



(a) Murete M209 (simples); (b) Murete M213 (lâmina de microbetão); (c) Injeção por gravidade de *grout* no murete M213

Figura 3.8 – Representação esquemática dos muretes e introdução de *grout*

A sequência do procedimento foi a seguinte, furação da alvenaria, injeção dos furos com *grout* (SikagROUT®-213) e colocação dos varões roscados M12. Deixou-se secar e posteriormente foi

colocada a cantoneira com regularização da superfície de contato entre a mesma e a alvenaria com gesso (e/ou microbetão com argamassa de cimento no caso do murete M213).

Da realização do ensaio da ligação pavimento/parede obtiveram-se os valores necessários ao cálculo da força máxima aplicada durante o carregamento e nas respectivas recargas, Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultados obtidos do ensaio de ligação parede-pavimento

Ensaio Ligação pavimento/parede	Nível da cantoneira	CC6 (kN)	CC7 (kN)	Força máxima aplicada na cantoneira (kN)
<b>Murete M209</b>	Superior	23,3	11,5	13,63
	Inferior	26,0	12,8	15,07
<b>Murete M213 (Reforço de microbetão)</b>	Superior	62,0	30,1	33,84
	Inferior	80,8	37,4	45,29

Da realização do ensaio de compressão axial obteve-se os valores correspondentes às tensões e deformações máximas a que os muretes foram sujeitos, Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resultados obtidos do ensaio de compressão axial

Ensaio Compressão axial	Força máxima (kN)	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação máxima (‰)
<b>Murete M209</b>	241,9	0,50	5,7	4,7
<b>Murete M213 (Reforço de microbetão)</b>	325,5	0,68	-	-

Procedeu-se por fim à determinação da profundidade de carbonatação dos muretes usando uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,5% e uma fita métrica. Caso a profundidade de carbonatação atingisse os 200mm, valor correspondente a metade da espessura do murete, isto significaria que o mesmo se encontrava totalmente carbonatado. Obtiveram-se os valores médios observados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Profundidade de carbonatação média

Muretes	Profundidade de carbonatação média (mm)	Profundidade de carbonatação média
<b>M209</b>	71,6	35,8
<b>M213</b>	80,0	40,0

### 3.3.3 Trabalho de C. Justiniano (2016)

No presente trabalho de investigação sobre “Ligação por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria reforçadas” foi utilizado um murete construído em 2010, na sequência da tese de doutoramento do orientador da dissertação (Pinho, 2007).

O murete foi submetido a dois ensaios experimentais. O primeiro ensaio consistiu em observar o comportamento de uma ligação pavimento/parede, simulada pela fixação de uma cantoneira ao murete com o auxílio de pregagens. No segundo ensaio observou-se o comportamento dos muretes à compressão axial, e posteriormente determinou-se o grau de carbonatação do murete.

Antes de ser ensaiado, o murete sofreu uma série de procedimentos de preparação prévios aos seus ensaios, nomeadamente, foi reforçado na superfície frontal por duas lâminas de microbetão com 25mm de espessura intercaladas no centro por uma rede metálica. A rede metálica não apresentava largura suficiente para cobrir toda a altura do murete, deste modo foi sobreposta, perto da zona central, como mostra a Figura 3.9. A rede foi colocada quatro dias após a aplicação da primeira lâmina de microbetão, procedendo-se posteriormente à colocação da segunda lâmina de microbetão.

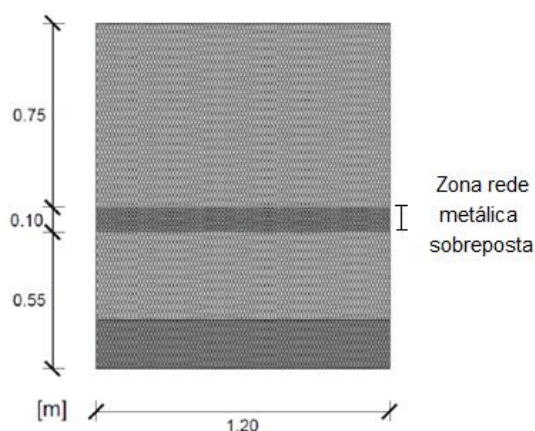


Figura 3.9 – Disposição da rede metálica no murete

(Justiniano,2016)

Surgiu a necessidade de colocar um lintel pré-existente, para garantir uma distribuição uniforme das cargas verticais aplicadas sobre o murete. Com o objetivo de ensaiar as ligações pavimento/parede, foram realizadas 3 furações no murete, a 3 níveis: superior, intermédio e inferior. Estes furos foram executados com um diâmetro de 16mm, comprimento de 300mm e uma inclinação de 15° com a horizontal, para assegurar posteriormente o preenchimento dos mesmos com *grout*, por ação da gravidade, e a colocação de varões de aço roscados com 12mm de diâmetro. Na Figura 3.10 pode observar-se os 3 diferentes níveis de posicionamento das pregagens.



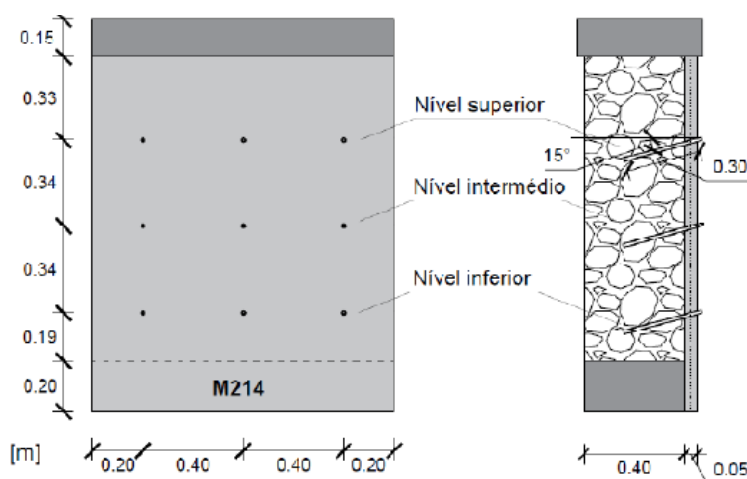


Figura 3.10 – Representação esquemática das furações no murete M214  
(Justiniano, 2016)

Após a preparação das ligações no murete, este é levado para o sistema de ensaio, onde sobre os diferentes níveis é fixada a cantoneira e são inseridas 2 vigas metálicas uma paralela assente na cantoneira e outra perpendicular.

Após a realização do ensaio de ligação nos diferentes níveis obtiveram-se os valores da força máxima aplicada durante o carregamento, indicados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Resultados obtidos do ensaio de ligação parede-pavimento

Ensaio Ligação pavimento/parede	Nível da cantoneira	Força máxima aplicada na cantoneira (kN)
<b>Murete M214 (Reforço de microbetão)</b>	Superior	87,3
	Intermédio	60,0
	Inferior	58,7

Após a realização do ensaio de compressão axial obtiveram-se valores correspondentes às tensões e deformações máximas a que o murete esteve submetido, Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Resultados obtidos do ensaio de compressão axial

Ensaio Compressão axial	Força máxima (kN)	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (‰)
<b>Murete M214 (Reforço de microbetão)</b>	430,72	0,90	3,51

Terminado o ensaio de compressão axial, procedeu-se à limpeza das superfícies do murete já degradado e prosseguiu-se para a aspersão da solução alcoólica fenolftaleína a 0,5% de modo a determinar a profundidade de carbonatação do murete com auxílio de uma fita métrica. Obtiveram-se os seguintes valores indicados na Tabela 3.13 para a profundidade de carbonatação.

Tabela 3.13 – Profundidade de carbonatação média

Muretes	Profundidade de carbonatação média (mm)	Profundidade de carbonatação média (%)
M214	92,0	46,0

### 3.3.4 Trabalho de V. Hritiu (2016)

No presente trabalho “Análise experimental da ligação por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria de pedra tradicional” foi usado um murete realizado no seguimento da linha de investigação iniciada pela tese de doutoramento de Pinho (2007).

O murete usado foi submetido a dois ensaios experimentais, sendo que o primeiro consistiu em analisar o comportamento de uma ligação pavimento/parede, simulada pela fixação de uma cantoneira com recurso a pregagens ao murete. O segundo ensaio consistiu em observar o comportamento do murete à compressão axial e por determinou-se o grau de carbonatação do mesmo.

Antes de ser submetido aos ensaios experimentais, foi necessário realizar uma série de trabalhos preparatórios prévios ao murete, nomeadamente, proceder à colocação de um lintel sobre o mesmo para garantir uma distribuição uniforme das cargas verticais. O lintel foi assente após ser aplicada uma camada de argamassa comentícia sobre a superfície superior do murete.

Para garantir uma transmissão uniforme de tensões entre a superfície da cantoneira e a superfície do murete foi realizada uma camada de regularização com recurso a uma argamassa comentícia. Esta camada de regularização foi feita em 3 níveis, espaçados de 30 cm cada.

Após a realização das camadas de regularização, procedeu-se à execução de 3 furações por nível com aproximadamente 300 mm de profundidade, 16mm de diâmetro e uma inclinação descendente de 15° com a horizontal, Figura 3.11. Depois de limpos, os furos foram preenchidos por gravidade com um *grout* da marca Sika (Sikagrout®-213), e com o auxílio de um berbequim com baixa rotação foram inseridos varões roscados com diâmetro 12mm.

Sobre as pregagens existentes nos diferentes níveis assenta a cantoneira que por sua vez suporta uma viga metálica disposta longitudinalmente que possui o objetivo de distribuir uniformemente as cargas aplicadas à cantoneira. Uma outra viga colocada disposta perpendicularmente à primeira simula a ação do pavimento de madeira habitualmente existente em edifícios antigos.

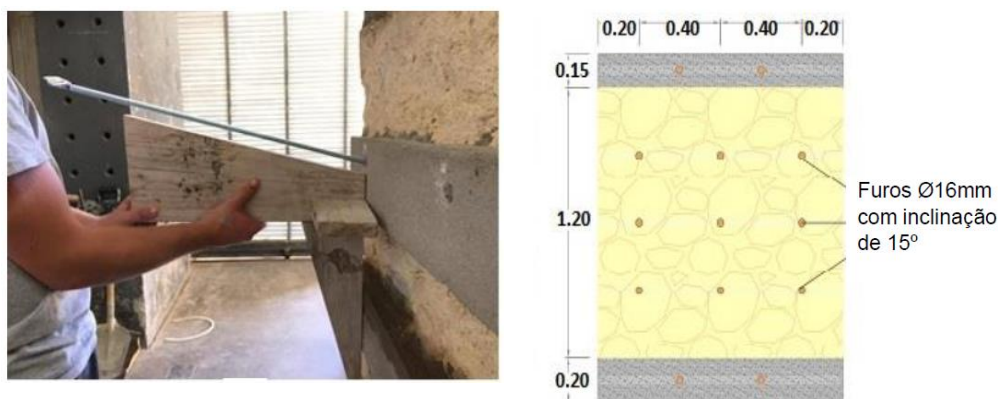


Figura 3.11 – Representação esquemática das furações no murete M205

(Hritiu, 2016)

Do ensaio das ligações pavimento/parede realizado ao murete M205 utilizado nesta dissertação, obtiveram-se os valores necessários ao cálculo da força resistente da cantoneira e da força máxima aplicada durante o carregamento, Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Resultados obtidos do ensaio de ligação parede-pavimento

Ensaio Ligação pavimento/parede	Nível da cantoneira	CC6 (kN)	CC7 (kN)	Força máxima aplicada na cantoneira (kN)
<b>Murete M205</b>	Superior	83,4	40,87	44,56
	Intermédio	75,53	37,58	39,94
	Inferior	94,80	41,45	55,35

Do ensaio de compressão axial obtiveram-se os valores relativos às tensões e deformações máximas a que o murete esteve sujeito, Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Resultados obtidos do ensaio de compressão axial

Ensaio Compressão axial	Força máxima (kN)	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação máxima (‰)
<b>Murete M205</b>	374,4	0,780	11,5	9,6

Após o ensaio de compressão axial, que provocou o colapso parcial do murete iniciou-se o processo de medição da profundidade de carbonatação com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,5% e o auxílio de uma fita métrica. Obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Profundidade de carbonatação média

Muretes	Profundidade de carbonatação média (mm)	Profundidade de carbonatação média (%)
<b>M205</b>	105,0	52,5



# Capítulo 4

## Trabalho experimental

### 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se uma descrição dos ensaios experimentais efetuados no âmbito da presente dissertação, incluindo trabalhos de preparação, descrição do sistema de ensaio e resultados obtidos.

Dos ensaios realizados, pretende-se, inicialmente, simular a ligação de um pavimento a uma parede de alvenaria de pedra. Para tal, é utilizado um modelo experimental de alvenaria de pedra (murete) com um sistema de ligação parede/pavimento constituído por conectores metálicos. Posteriormente, determina-se a resistência do murete à compressão axial e avalia-se o seu grau de carbonatação. O murete utilizado, com a designação M206, é proveniente de uma segunda série de muretes construídos no DEC FCT-UNL, no seguimento da tese de doutoramento de Pinho (2007). Os trabalhos de preparação realizados dividem-se nas seguintes etapas:

1. Regularização da superfície do murete nas zonas de apoio da cantoneira (3 níveis);
2. Identificação, limpeza e colocação do lintel de betão armado sobre o murete;
3. Realização de furos no murete, para fixação da cantoneira
4. Colocação de varões roscados e injeção de calda de cimento nos furos;

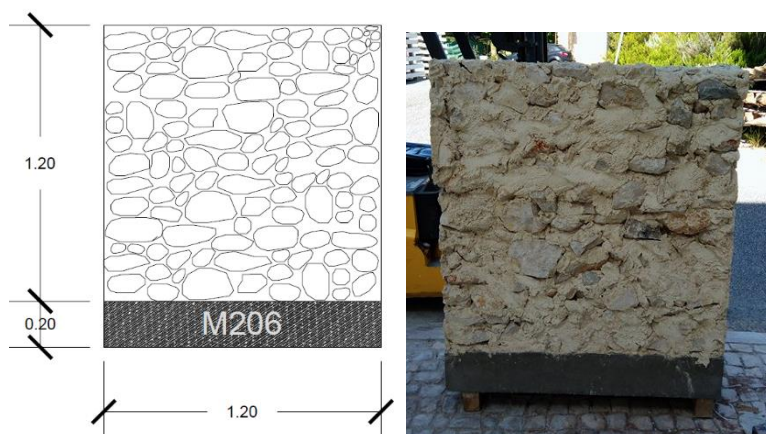
Todos os trabalhos de preparação, bem como os ensaios experimentais foram realizados no LabDEC na FCT-UNL.

### 4.2 Caracterização do murete M206

O murete M206 utilizado tem as dimensões, 1,20 x 1,20 x 0,4 m<sup>3</sup> (largura x altura x espessura) e é constituído por 75% de pedra calcária e 25% de argamassa de assentamento. A dimensão máxima de pedra calcária constituinte é da ordem de D=25 cm e a argamassa de assentamento é composta por cal aérea hidratada juntamente com areia de rio e areeiro ao traço volumétrico (1:1,5:1,5), Figura 4.1.

Para facilitar o seu transporte, foi construído sobre uma base de betão armado com 0,20m de altura, e mantido protegido da chuva e da radiação solar num “abrigo” coberto, junto ao LabDEC, até ao momento da sua preparação. Após a movimentação do mesmo para o interior do

laboratório, com recurso a porta-paletes e empilhador, procedeu-se à sua limpeza para retirar eventuais impurezas e materiais soltos.



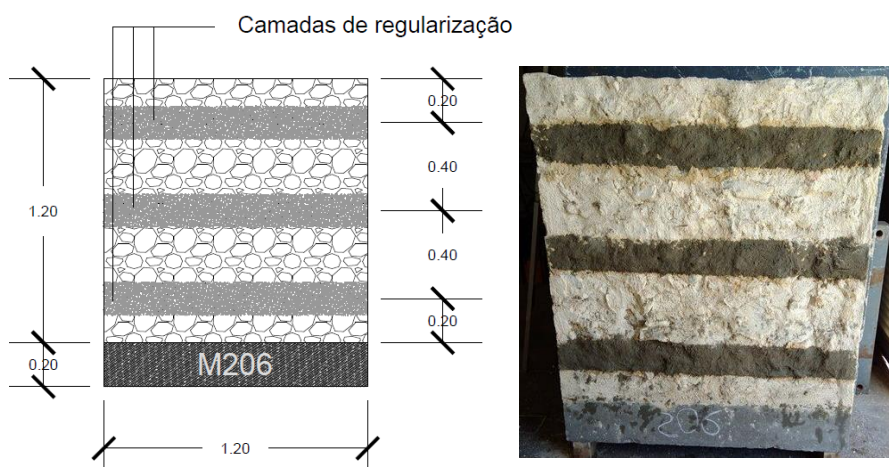
(a) - Representação esquemática do murete; (b) - Vista frontal do murete seleccionado

Figura 4.1 – Aspeto do murete M206

### 4.3 Trabalhos de preparação do murete M206

#### 4.3.1 Regularização da superfície do murete

Neste trabalho experimental, optou-se por começar a preparação do murete pelas camadas de regularização nas zonas de contacto entre a superfície do murete e a cantoneira. Estas camadas de regularização foram efetuadas em 3 níveis diferentes (superior, intermédio e inferior) com o objetivo de obter vários resultados no mesmo murete. As camadas de regularização proporcionam uma transmissão uniforme da tensão entre a superfície da cantoneira e a superfície do murete, e foram executadas com a disposição apresentada esquematicamente na Figura 4.2 a) e b).

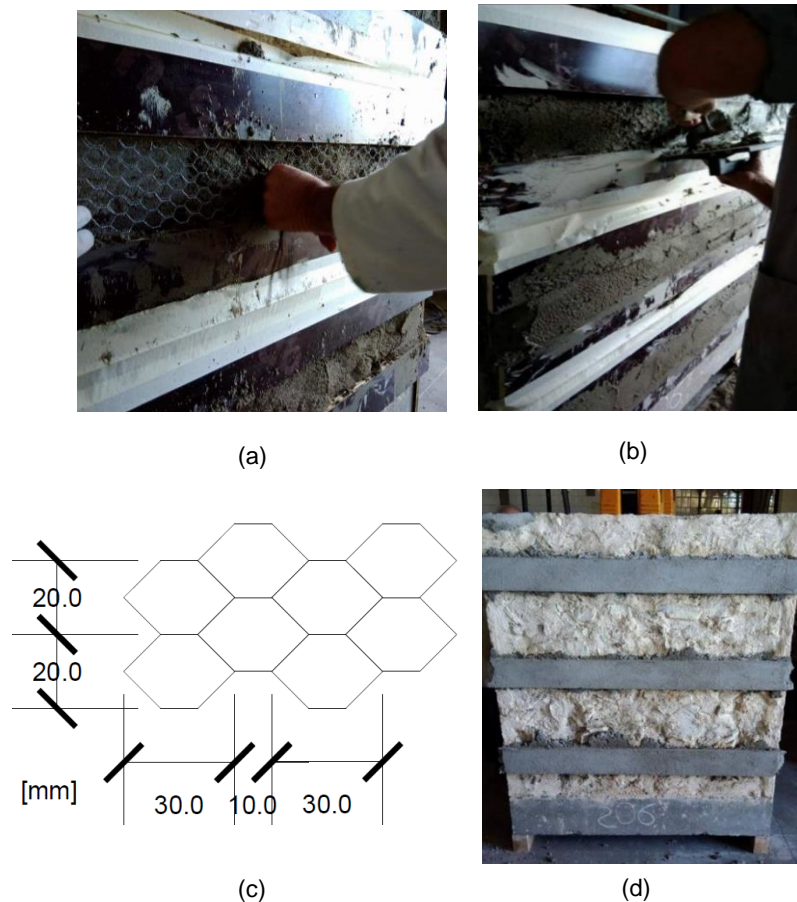


(a) – Representação esquemática das camadas de regularização; (b)- Camadas de crespido nos 3 níveis

Figura 4.2 – Regularização da superfície do murete M206 para apoio da cantoneira

Cada camada de regularização é armada no seu interior por uma malha metálica de aço, apresentando uma espessura total de 2 cm. As camadas são constituídas por argamassa comentícia com traço volumétrico (1:3), uma parte de cimento para três de areia, da qual 1/3 é areia de areeiro e 2/3 areia de rio.

Inicialmente, foi colocada cofragem a delimitar a largura da camada de apoio da cantoneira e procedeu-se ao humedecimento da superfície do murete. Após o referido, procedeu-se à aplicação de uma lâmina de argamassa promotora de aderência, o crespido, com um traço volumétrico de (1:3) (Cimento: Areia de rio). Sobre o crespido, foi aplicada uma lâmina de argamassa comentícia com aproximadamente 1 cm de espessura, sobre a qual foi colocada uma malha metálica de aço, Figura 4.3 (a) e (b), com as dimensões indicadas na Figura 4.3 (c). De seguida foi aplicada uma segunda lâmina de argamassa comentícia à qual se conferiu um aspeto plano e vertical da superfície com o auxílio de uma talocha, Figura 4.3 (d).



(a)-Posicionamento da malha metálica; (b)- Execução de camada do nível superior; (c)- Representação esquemática das dimensões da malha metálica de aço; (d)- Camadas de regularização aos 3 níveis

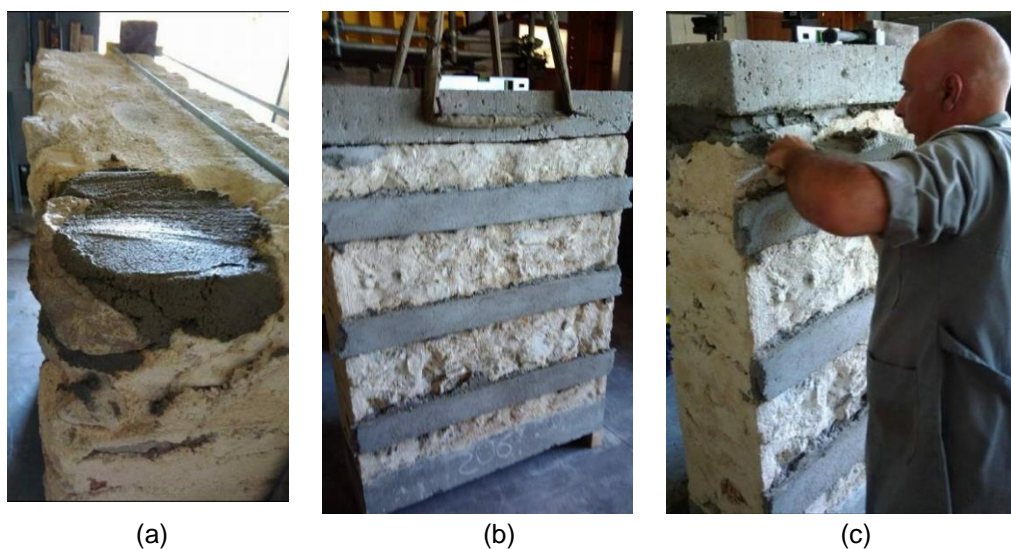
Figura 4.3 – Execução das camadas de regularização do murete M206



#### 4.3.2 Identificação, limpeza e colocação do lintel

Foi aplicado ao murete M206, um lintel em betão armado com aproximadamente 15cm de altura e dimensões em planta semelhantes às dimensões da superfície superior do murete. Este elemento é responsável por garantir a distribuição uniforme das cargas verticais aplicadas sobre a alvenaria. O lintel foi deslocado para o interior do laboratório com o auxílio do porta-paletes, onde posteriormente foi feita a sua limpeza com ar-comprimido para retirar partículas soltas acumuladas. Antes de aplicado o lintel sobre o murete, observou-se que num dos cantos superiores da superfície do murete existia uma pedra fracamente suportada por argamassa de assentamento e em risco eminente de queda, influenciando a resistência mecânica nesta zona. Deste modo, procedeu-se à sua remoção e reintegração na mesma posição, com o recurso a uma camada de argamassa comentícia com a mesma constituição da usada para apoiar o lintel, Figura 4.4 (a).

Para o assentamento do lintel sobre o murete foi utilizada uma argamassa constituída por cimento, areia de areeiro e areia de rio com traço volumétrico (1:3), com 1/3 de areia de areeiro e 2/3 de areia de rio, Figura 4.4 (b) e (c). Antes da aplicação da argamassa, ambas as superfícies, do lintel e do murete, foram humedecidas para que não existisse absorção de água da mistura.



(a)-Remoção e reaplicação de pedra calcária com argamassa comentícia; (b)- Posicionamento do lintel;  
(c)-Aplicação de argamassa (remate das juntas);

Figura 4.4 – Colocação de lintel em betão armado sobre o murete M206

A mistura da argamassa foi realizada com recurso a um misturador elétrico, e foi espalhada sobre toda a superfície superior do murete garantindo uma espessura uniforme para garantir o correto nivelamento do lintel. Posteriormente, foram realizadas 2 furações no lintel e 2 furações na base do murete para que estes fossem fixados à estrutura de suporte de ensaio durante a realização do mesmo. Os furos no lintel, depois da fixação deste, impedem a sua queda em caso de

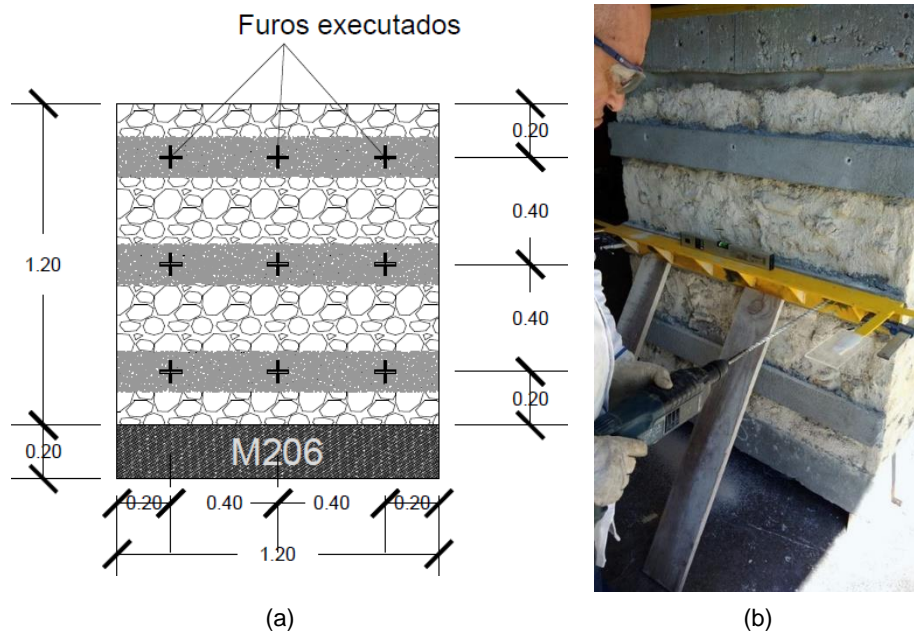


desintegração do murete e os furos na base do murete, impedem que este se desloque para fora da plataforma de ensaio durante a realização do mesmo.

### 4.3.3 Realização de furos no murete

Após a regularização da superfície do murete nos três níveis de contato da cantoneira, foram realizadas furações de modo a que as mesmas coincidisse com os furos pré-existent na cantoneira. Os furos foram executados no sentido perpendicular à superfície de contacto da cantoneira com recurso a um berbequim a baixa velocidade de rotação de modo a comprometer o menos possível a integridade da alvenaria. Pode observar-se na Figura 4.5 (a) a representação esquemática da disposição dos furos efetuados no murete.

Inicialmente, fez-se uma primeira série de furações, com uma broca de 8mm de diâmetro, que consistiu na abertura parcial de todos os furos. Nas séries seguintes, fez-se um aumento gradual do diâmetro até 16mm de modo a alargar os furos para posterior introdução dos varões e injeção da calda. Em cada nível foram executados três furos com uma profundidade igual à espessura do murete, atravessando o mesmo por completo, Figura 4.5 (b).



(a) Representação esquemática do posicionamento do murete; (b) - Execução das furações no nível intermédio

Figura 4.5 – Furações no murete

#### 4.3.4 Colocação de varões roscados, execução e injeção de calda de cimento nos furos

Após a execução das furações nos três diferentes níveis, iniciou-se o processo de limpeza dos furos com auxílio do aspirador e de um tubo de 10mm de diâmetro, de modo a retirar as partículas soltas resultantes da perfuração na alvenaria.

Concluído o processo de limpeza, procedeu-se à introdução dos varões roscados M12 nas furações, estes foram enroscados lentamente para não danificar a alvenaria nem provocar a queda de mais partículas no seu interior que impedissem a introdução dos varões. Os varões atravessam a total espessura do murete e posteriormente são fixos nas suas extremidades com recurso a um sistema de chapas metálicas de ancoragem e apertados com anilhas e porcas. Para garantir igualmente uma distribuição uniforme das tensões aplicadas sobre a superfície traseira do murete regularizou-se essa zona de contacto, tal como mostra a Figura 4.6, com uma argamassa cimentícia com a mesma constituição da argamassa usada para executar as camadas de regularização na face frontal do murete.



Figura 4.6 – Nivelamento da superfície tardoaz ao apoio com argamassa cimentícia e chapas metálicas de ancoragem

Os procedimentos de injeção de calda iniciaram-se cinco dias após a realização das camadas de regularização traseiras do murete. Na face frontal do murete sobre os varões de aço foram inseridos pequenos tubos de PVC transparente, com 10mm de diâmetro, pelos quais se fez a admissão da calda de cimento para o interior dos furos. De seguida, retiraram-se as chapas metálicas aplicadas na superfície traseira e foi realizado o mesmo procedimento mas com tubos de 6mm de diâmetro, que serviram como tubos de fuga alertando para a presença de calda em excesso depois da mesma atravessar a total espessura do murete.

Para impedir que a calda injetada seja perdida pela superfície do murete foi aplicada uma camada de gesso como apresentado na Figura 4.7. Após estes procedimentos, iniciou-se a preparação da calda a injetar no interior do murete. Para garantir que os furos eram completamente preenchidos e facilitar o seu espalhamento optou-se por uma calda mais fluída. A calda usada é constituída por cimento e água, com uma dosagem de água de 22%, sendo que para fazer a

mistura foram usados 6 kg de cimento para 1300 ml de água. A injeção da calda no interior dos furos foi feita através dos tubos previamente inseridos sobre os furos, no qual se adaptou uma pistola de injeção que facilitou este procedimento.



Figura 4.7 – Procedimento de injeção da calda

Após o endurecimento da calda de cimento, e depois de colocado o murete sobre a base de ensaio, as ligações foram preparadas para serem ensaiadas. Procedeu-se à colocação da cantoneira sobre o primeiro nível a ser ensaio e ajustou-se a sua posição ao murete com recurso a anilhas e porcas. Para promover o mesmo aperto em todas as zonas, aplicou-se nas porcas um aperto com valor de 30 N.m, com o auxílio de uma chave dinamométrica como representado na Figura 4.8.

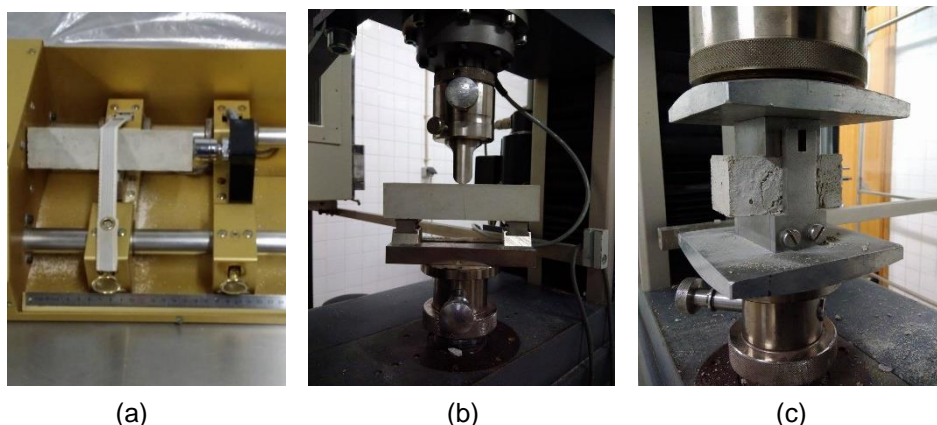


Figura 4.8 – Aperto das porcas utilizando chave dinamométrica

#### 4.4 Caracterização dos materiais

Nesta secção caracteriza-se os materiais utilizados, nomeadamente, a argamassa, utilizada para regularização da superfície de apoio da cantoneira, e a calda de cimento injetada nos furos. De forma a caraterizar mecanicamente os materiais referidos, utilizaram-se provetes prismáticos de

4x4x16 cm<sup>3</sup>, para determinar o módulo de elasticidade dinâmico (CEN, EN 14146), a resistência à flexão e a resistência à compressão (CEN, EN 1015-11), Figura 4.9. Até se proceder à realização dos ensaios, os provetes mantiveram-se condicionados a uma temperatura de 20±2°C e a uma humidade relativa de 65±5 %. No dia anterior a serem ensaiados foram colocados na estufa e condicionados a uma temperatura de 60±2°C, para se proceder à sua análise secos.



(a)

(b)

(c)

(a)-Módulo de elasticidade dinâmico; (b)- Ensaio de resistência à flexão; (c)- Ensaio de resistência à compressão

Figura 4.9 - Ensaio mecânicos realizados na argamassa de regularização da superfície e na calda de cimento

#### Argamassa de regularização da superfície de apoio da cantoneira

A regularização da superfície do murete foi executada por fases. Primeiramente, foi aplicada uma camada inicial, o crespido, com o objetivo de promover a aderência da argamassa à superfície. Esta camada apresenta um traço volumétrico de 1:3 (Cimento: Areia de rio). Posteriormente, aplicaram-se mais duas camadas de argamassa, intercaladas por uma rede metálica, com um traço volumétrico de (1:3), uma parte de cimento para três de areia, sendo 1/3 areia de areeiro e 2/3 areia de rio. Na Figura 4.10 e na Tabela 4.1, apresenta-se a baridade dos diferentes materiais constituintes da argamassa e o procedimento de ensaio usado na sua determinação (CEN, NP EN1097-3).



Figura 4.10 – Procedimento experimental para determinação da baridade

Tabela 4.1 – Baridade dos materiais utilizados na argamassa

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
Cimento	1039,0
Areia de Areeiro	1480,0
Areia de Rio	1426,0

Aquando da realização da argamassa de regularização da superfície preencheram-se doze moldes prismáticos, seis referentes à primeira camada aplicada após o crespido e outros seis referentes à segunda camada aplicada sobre a rede metálica. Para a primeira camada, o resultado médio obtido para o valor do módulo de elasticidade dinâmico foi de 20,3 GPa, da resistência à flexão de 4,2 MPa e da resistência à compressão de 13,6 MPa. Para a segunda camada, o resultado médio obtido para o valor do módulo de elasticidade dinâmico foi de 17GPa, da resistência à flexão de 3,2 MPa e da resistência à compressão de 9,6 MPa

Os resultados individuais de cada provete ensaiado, podem ser analisados no Anexo I, nas Tabelas A.1 e A.3 para as resistências à flexão e à compressão e nas Tabelas A.2 e A.4 para os módulos de elasticidade dinâmico.

#### **Calda de injeção**

Para garantir a fixação dos varões de aço colocados no murete recorreu-se à utilização de uma calda constituída por água e cimento com uma proporção água/cimento de 22% (em massa).

Após a injeção da calda de cimento realizaram-se três provetes prismáticos. O resultado médio obtido para o valor do módulo de elasticidade dinâmico foi de 13,8 GPa, da resistência à flexão de 2,7 MPa e da resistência à compressão de 26,0 MPa. Os resultados individuais de cada provete ensaiado, podem ser analisados no Anexo I, na Tabela A.5 para as resistências à flexão e à compressão e Tabela A.6 para os módulos de elasticidade dinâmico.

#### **4.5 Preparação do sistema e instrumentação de ensaio**

O sistema de ensaio é constituído por um pórtico metálico, composto por dois pilares HEB300 aos quais é fixo uma viga horizontal HEB450 com recurso a oito parafusos M24 em cada extremidade. A estrutura é reforçada por quatro varões roscados de pré-esforço *Dywidag*, com 36mm de diâmetro, fixas à laje de pavimento. Para complementar foi instalado um sistema de segurança que impede a queda de uma viga metálica, responsável pela distribuição das cargas nela aplicadas sobre o murete.

O sistema de ensaio descrito anteriormente é usado para a realização do ensaio de compressão axial do murete, sendo adaptado para a realização do ensaio de ligação pavimento-parede às cargas verticais. A instrumentação utilizada nos ensaios de compressão axial e ensaio de ligação

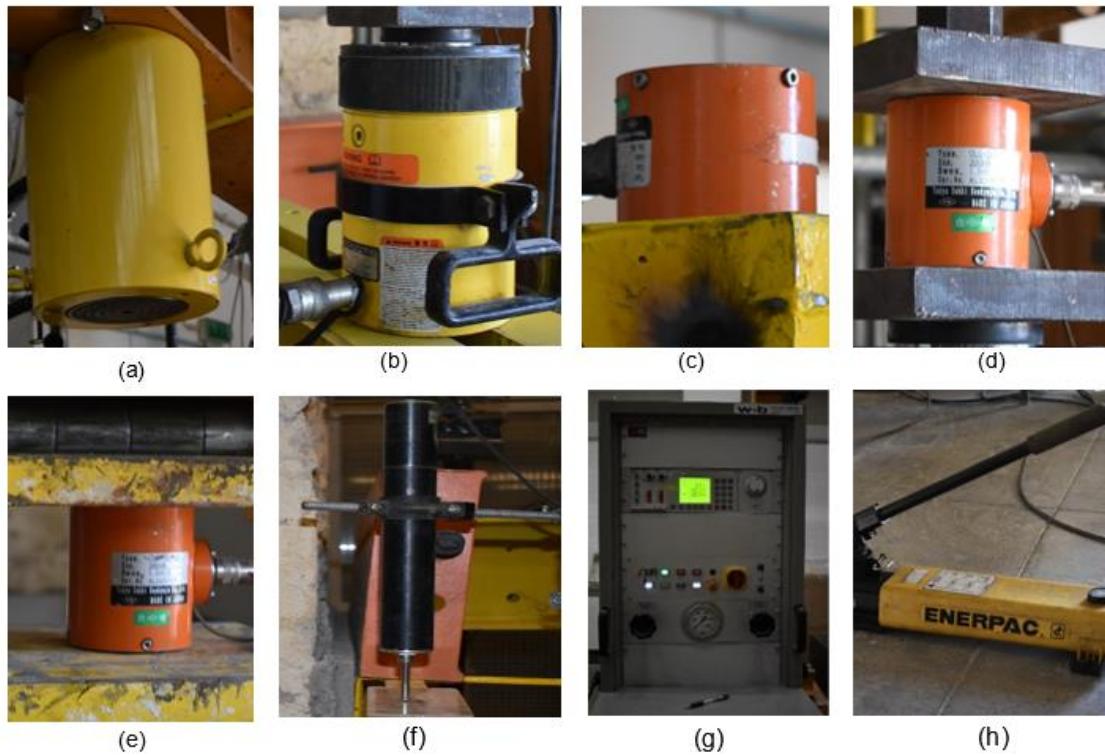
pavimento-parede é constituída pelos elementos presentes na Figura 4.11 e descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Instrumentação utilizada nos ensaios

Ensaio		Instrumentação
Ensaio à compressão axial	Ensaio da ligação às cargas verticais	Um cilindro hidráulico (ENERPAC CLRG-3006) com uma capacidade de 3000 kN, fixo ao pórtico metálico e utilizado para aplicar as cargas verticais ao murete
		Uma célula de carga CC1 (TML) com capacidade de carga de 500 kN, colocada entre o êmbolo do cilindro hidráulico e a viga metálica e utilizada para medir as cargas verticais aplicadas ao murete.
		Dois defletómetros (D5 e D6) com um curso de 100mm e com precisão de $100 \times 10^{-6} \text{mm}^{-1}$ –medem os deslocamentos no topo da viga metálica situada sobre o murete
		Uma bomba hidráulica (Walter+Bai ag) associada ao cilindro hidráulico (ENERPAC CLRG-3006)
		Dois <i>data loggers</i> - um regista os dados experimentais referentes aos defletómetros, outro os dados referentes às células de carga, e transmite-os para suporte informático
		Um computador com o <i>software Catman 4.0</i> , usado para monitorizar e registar os dados experimentais dos diferentes ensaios
		Um cilindro hidráulico (ENERPAC RCH-603) com capacidade de 600 kN, colocado a meio vão da viga metálica usada para simular o pavimento
		Duas células de carga (TML) com capacidade de carga de 300 kN - CC2 foi colocada sobre o cilindro hidráulico que atua aproximadamente a meio vão da viga que simula o pavimento e CC3 foi colocada na extremidade da viga que simula o pavimento sobre um bloco de betão
		Quatro defletómetros (D1, D2, D3 e D4) com um curso de 100mm e com precisão de $100 \times 10^{-6} \text{mm}^{-1}$ –medem os deslocamentos na cantoneira
		Uma bomba hidráulica manual (ENERPAC) associada ao cilindro hidráulico (ENERPAC RCH-603)

A disposição espacial da instrumentação descrita anteriormente pode ser observada na representação esquemática dos sistemas de ensaio indicados na Figura 4.12, 4.13, 4.14 e na representação real da Figura 4.15.





(a)- Cilindro hidráulico (ENERPAC CLRG-3006); (b)- Cilindro hidráulico (ENERPAC RCH-603); (c)- Célula de carga CC1 (TML); (d)- Célula de carga CC2 (TML); (e)-Célula de carga CC3 (TML); (f)- Defletómetro; (g)- Bomba hidráulica (Walter+Bai ag); (h)- Bomba hidráulica manual (ENERPAC)

Figura 4.11 – Instrumentação de ensaio

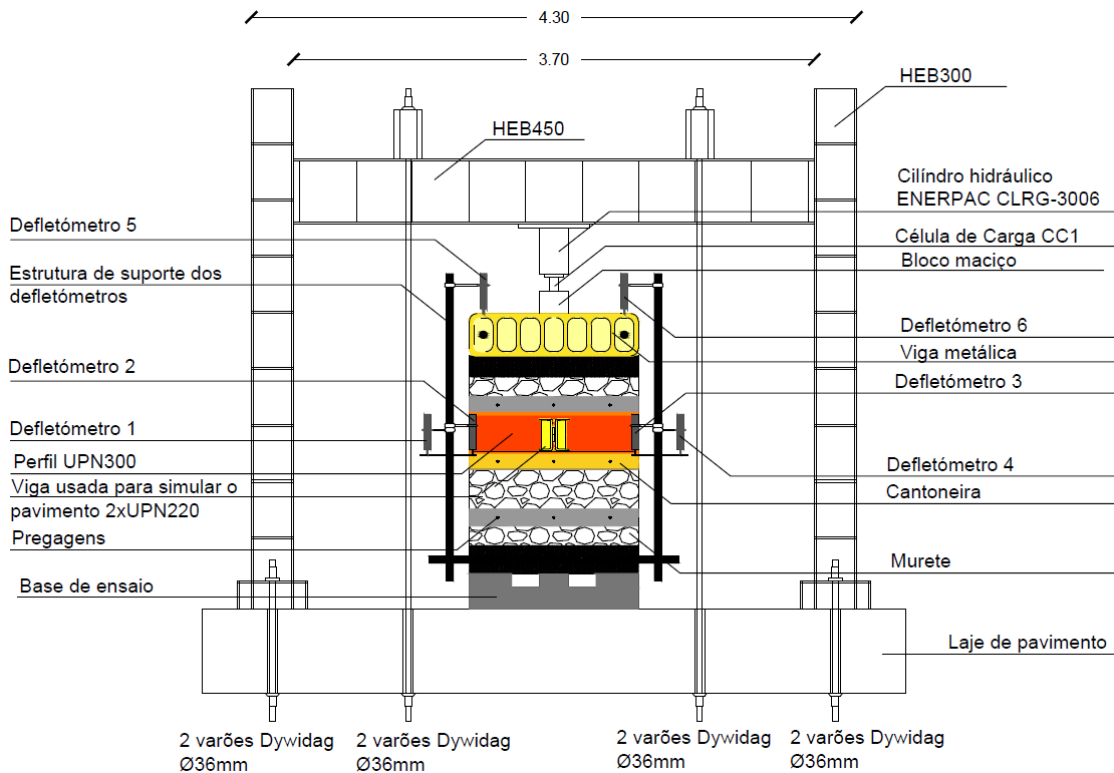


Figura 4.12 – Vista frontal do ensaio compressão axial (adaptado a ensaio de ligação parede-pavimento)

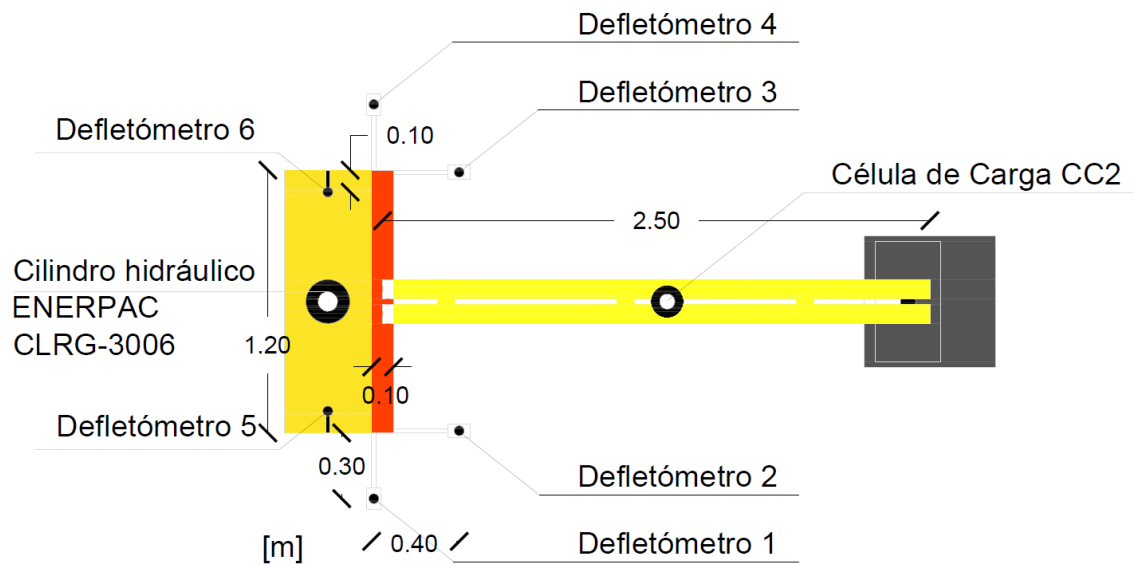


Figura 4.13 – Vista em planta da localização dos defletómetros, células de carga e cilindros hidráulicos

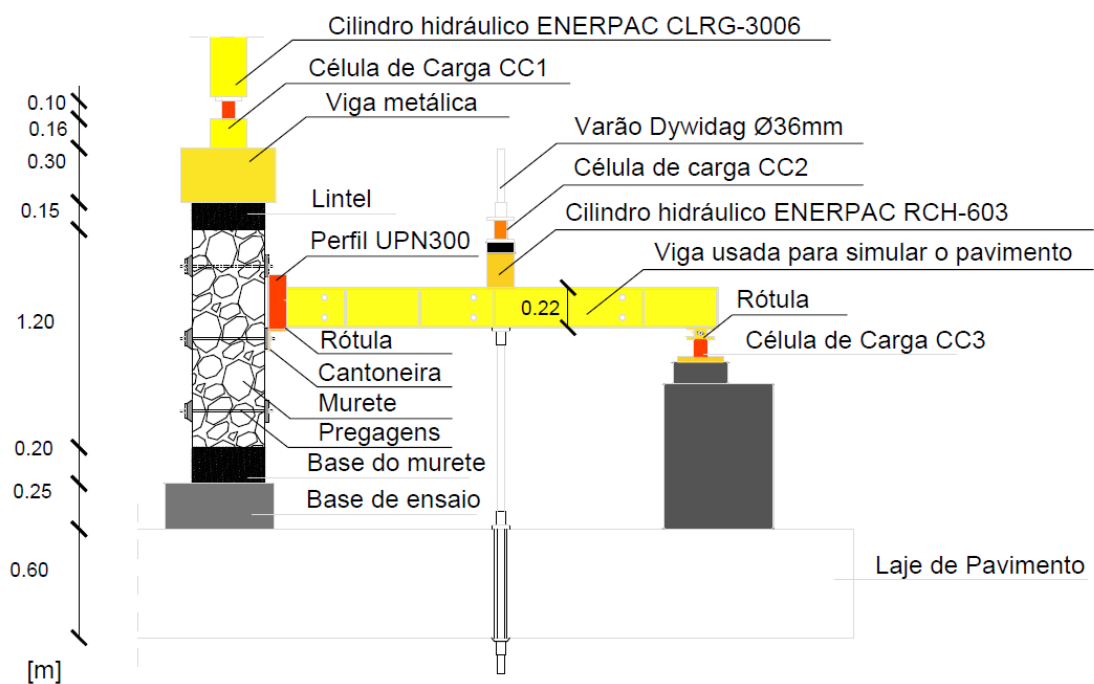


Figura 4.14 – Vista em corte do ensaio de ligação parede-pavimento





Figura 4.15 – Aspeto geral do sistema de ensaio de ligação parede-pavimento

#### 4.6 Ensaios realizados no murete M206

Na totalidade foi prevista a realização de quatro ensaios sobre o murete M206. Três desses ensaios pretendiam estudar o comportamento da ligação pavimento-parede e determinar a sua capacidade de carga. Um outro ensaio pretendia avaliar a resistência do murete à compressão axial. Posteriormente a esses ensaios determinou-se a profundidade de carbonatação do murete, com o intuito de avaliar a percentagem de murete carbonatado.

##### 4.6.1 Ensaio da ligação pavimento-parede às cargas verticais

Após a fixação da cantoneira sobre o primeiro nível a ser ensaiado, são dispostas duas vigas metálicas que assentam entre si. Sobre a cantoneira é colocado um perfil metálico (UPN300) com maior rigidez, que tem como objetivo distribuir uniformemente as cargas nela aplicadas. A viga metálica (2xUPN220), que simula o pavimento, é apoiada perpendicularmente sobre uma rótula cilíndrica existente no centro do perfil metálico. Aproximadamente meio vão da viga metálica é colocado um varão de pré-esforço de *Dywidag*, que impede a movimentação do cilindro hidráulico (ENERPAC RCH-603) e da célula de carga CC2 posteriormente colocados. Este cilindro hidráulico, associado a uma bomba hidráulica manual, é utilizado para aplicar o carregamento sobre a viga metálica.

Ao longo do ensaio foram registadas as cargas aplicadas na célula de carga CC2 situada aproximadamente a meio vão da viga metálica, e na célula de carga CC3 aplicadas na extremidade oposta da cantoneira. Foram ainda registados os deslocamentos detetados na cantoneira, registados pelos quatro defletómetros, D1 a D4. A força máxima aplicada na cantoneira foi determinada pela diferença dos valores registados nas células de carga CC2 e

CC3, com a adição da carga corresponde ao peso da viga metálica e dos elementos nela apoiados que não são registados pela célula de carga CC2. Ao peso destes elementos foi atribuído um valor de 2,0 kN.

Antes de se iniciar o ensaio foram estabelecidos dois critérios de paragem para o mesmo, sendo eles:

1. Contato entre a viga metálica (2xUPN220) que simula a ação do pavimento e o perfil metálico (UPN300) disposto longitudinalmente sobre a cantoneira, que distribui uniformemente as cargas sobre a mesma, Figura 4.16.
2. Danos observados no murete que possam comprometer a sua a realização dos ensaios seguintes.

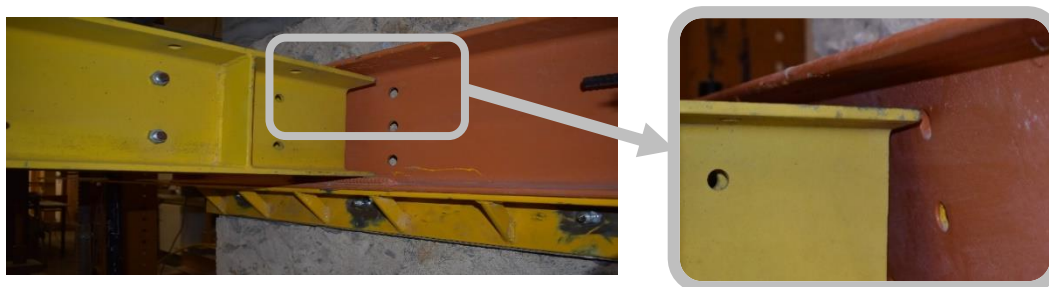
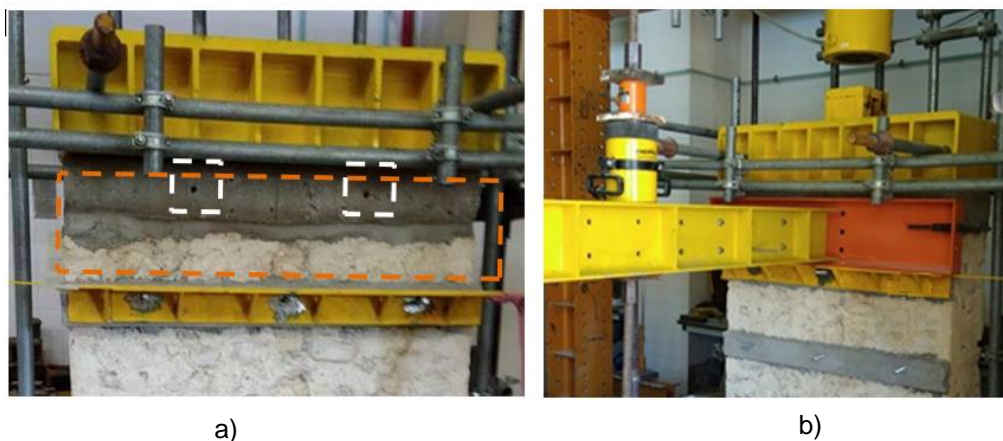


Figura 4.16 – Pormenor de contato entre vigas

O ensaio das ligações às cargas verticais foi inicialmente projetado para ser ensaiado em três níveis diferentes, de modo a possibilitar o máximo aproveitamento da área do murete. Contudo, aquando da preparação e montagem do sistema de ensaio, foi detetado um problema, que impossibilitava a realização do ensaio da ligação ao nível superior, Figura 4.17 (a). O perfil metálico (UPN300) quando assente sobre a cantoneira ultrapassava, em altura, as furações existentes no lintel que permitiam a sua fixação ao pórtico impedindo a sua queda. Por motivos de segurança, optou-se por não ensaiar a ligação a este nível, Figura 4.17 (b).



a) - Delimitação da posição do perfil metálico (UPN300) cobrindo os furos para fixação do lintel; (b)- Posição do perfil metálico (UPN300) no nível superior (sem fixação do lintel)

Figura 4.17- Ligação no nível superior

É importante referir ainda que no decorrer do ensaio ocorreu um lapso de montagem apenas observado após a conclusão do nível inferior da ligação. Foi detetada a ausência das chapas metálicas, pertencentes ao sistema de ancoragem com conectores metálicos. O sucedido deveu-se ao facto de nos trabalhos de preparação do murete, para proceder à injeção da calda, houve necessidade de retirar as chapas metálicas na face oposta à cantoneira para colocação dos tubos de entrada e saída de calda. Como tal, o ensaio foi suspenso e todo o processo de preparação referido no ponto 4.3 repetido, de modo a retificar a situação. Os dados recolhidos da primeira tentativa foram analisados e são apresentados da mesma forma que os obtidos na segunda tentativa.

### **1ª Tentativa**

Para se iniciar o ensaio da ligação começou por se aplicar uma pré-carga sobre o murete, com o auxílio da bomba hidráulica (Walter+Bai ag) associada ao cilindro hidráulico (ENERPAC CLRG-3006), a uma velocidade de 0,15 bar/s, uma carga de 96 kN corresponde uma tensão de 0,20 MPa. Esta tensão é mantida constante ao longo do ensaio, e tem o objetivo de simular as cargas permanentes a que as paredes se encontram submetidas num edifício.

#### **Ligação ao nível intermédio**

Com o auxílio da bomba hidráulica manual (ENERPAC) associada ao cilindro hidráulico (ENERPAC RCH-603), iniciou-se o carregamento da ligação aplicando bombadas constantes. À medida que a carga aplicada foi aumentando, foi-se observando do lado esquerdo do murete, o aparecimento crescente de uma fenda na camada de regularização. Esta fenda surgiu a meio da espessura da camada de regularização, na zona de junção entre duas camadas de argamassa e da rede metálica aplicada. Observou-se ainda um deslocamento superior do lado esquerdo comparativamente com o lado direito e o esmagamento da camada de regularização na zona inferior aos varões. A paragem do ensaio foi condicionada pelo contato entre a viga metálica e o perfil metálico. Na Figura 4.18 pode observar-se os danos resultantes do carregamento.



Figura 4.18 – Danos resultantes do carregamento no ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa)

Os valores máximos registados pelas células de carga CC2 e CC3, tal como a força máxima aplicada na cantoneira neste nível, estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores máximos registados no ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa)

Murete	Nível da Ligação		CC2 [kN]	CC3 [kN]	Força máxima aplicada na cantoneira [kN]
M206	1ª Tentativa	Intermédio	90,96	44,35	48,61

No diagrama da Figura 4.19, é apresentado a evolução do carregamento aplicado na ligação intermédia do murete. Todos os diagramas apresentados neste ponto foram prolongados até atingirem uma perda da capacidade resistente de 25% em relação à força máxima.

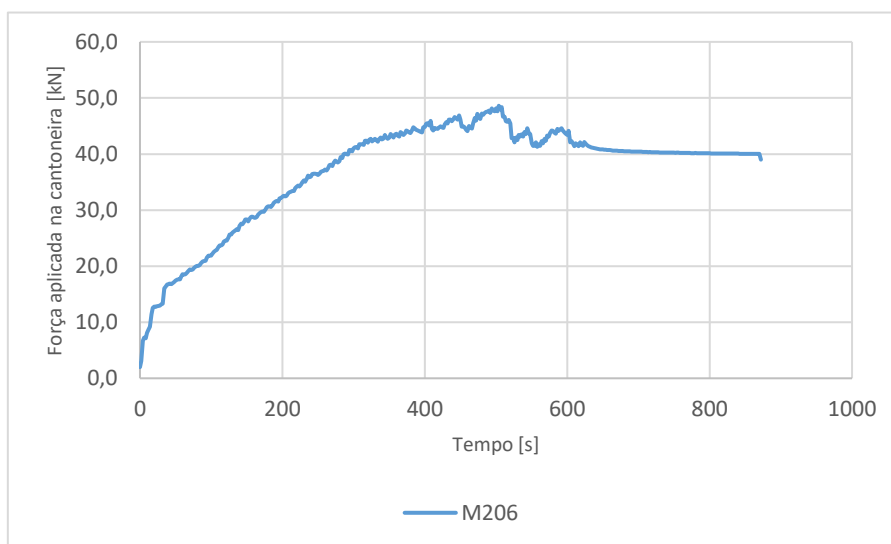


Figura 4.19 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa)

Da observação do diagrama força-deslocamento e do diagrama força-rotação, Figura 4.20 e 4.21, verifica-se que o deslocamento registado pelo defletómetro D1 é superior ao deslocamento efetuado pelo defletómetro D4, resultando numa rotação da cantoneira no plano do murete. Contudo, a rotação da cantoneira verificada no plano perpendicular ao murete é superior à rotação registada no próprio plano.

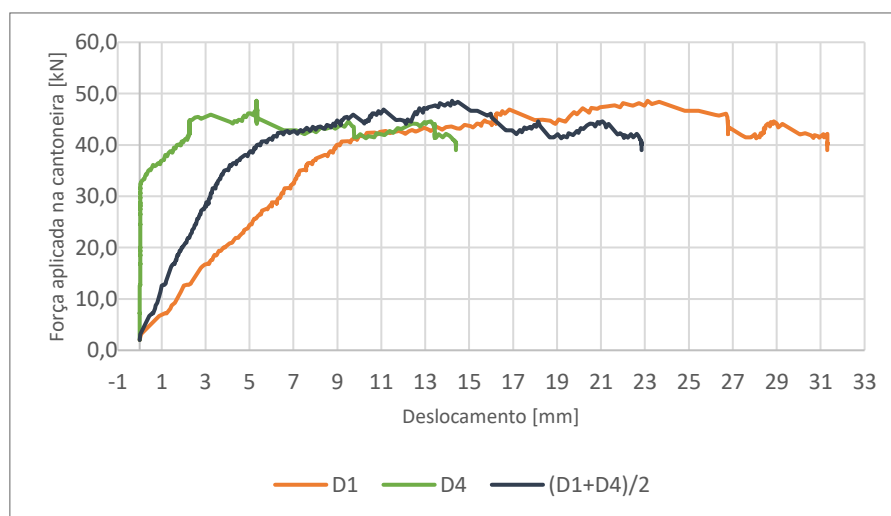


Figura 4.20 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa)

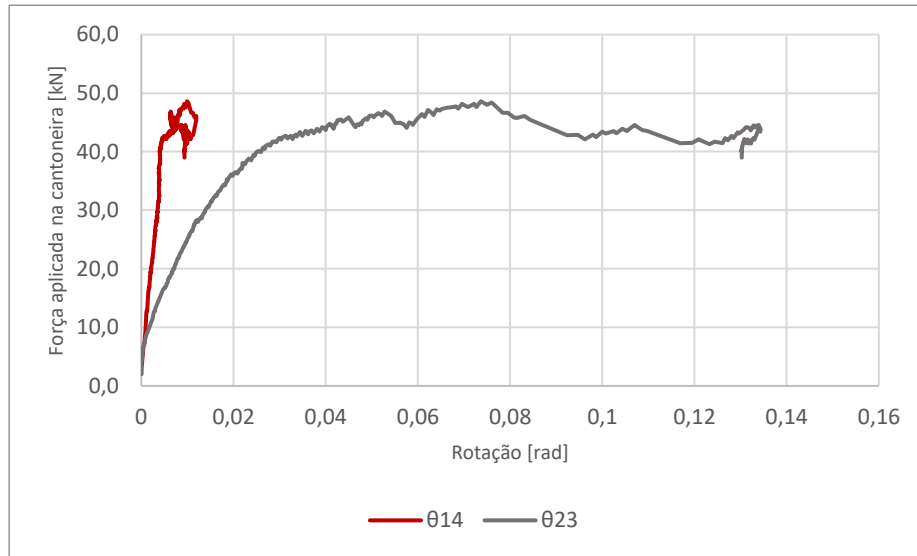


Figura 4.21 – Diagrama força-rotação do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (1ª tentativa)

### Ligação ao nível inferior

Após a realização do ensaio na ligação do nível intermédio, o sistema de ensaio foi reajustado, reposicionando a cantoneira no nível inferior, tal como o perfil metálico e a viga metálica. Repetiu-se o procedimento efetuado para o primeiro nível, promovendo o mesmo aperto em todos os varões com o auxílio de uma chave dinamométrica. O ensaio a este nível iniciou-se, à semelhança do anterior, com a aplicação de carga a velocidade constante. Com o decorrer do ensaio verificou-se um aumento do esmagamento da zona inferior da camada de regularização, resultando na queda de argamassa nessa zona. Após terminado o ensaio, devido ao contato entre a viga e o perfil metálico, e retirada a cantoneira, foi possível observar que os danos registados neste nível foram superiores aos anteriores, Figura 4.22.

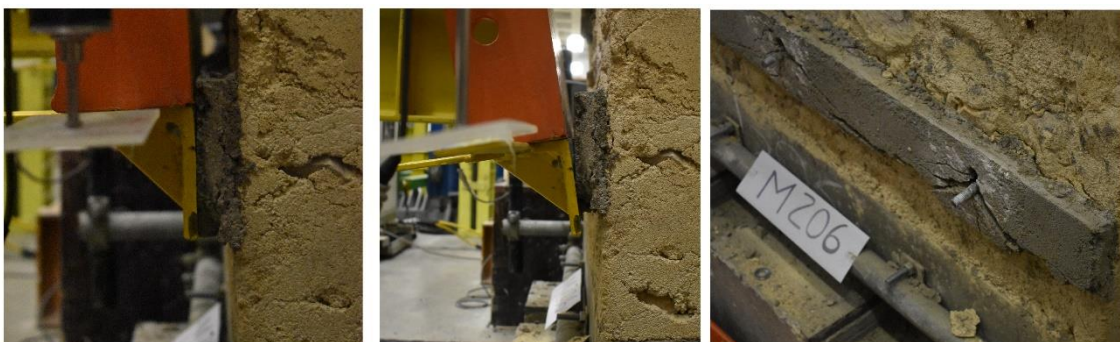


Figura 4.22 – Ensaio da ligação no nível inferior (1ª tentativa)

Os valores máximos registados pelas células de carga CC2 e CC3, tal como a força máxima aplicada na cantoneira neste nível, estão apresentados na Tabela 4.4.



Tabela 4.4 – Valores máximos registados no ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa)

Murete	Nível da Ligação		CC2 [kN]	CC3 [kN]	Força máxima aplicada na cantoneira [kN]
M206	1ª Tentativa	Inferior	76,58	37,3	41,29

O diagrama da evolução do carregamento aplicado na ligação inferior do murete é apresentado na Figura 4.23.

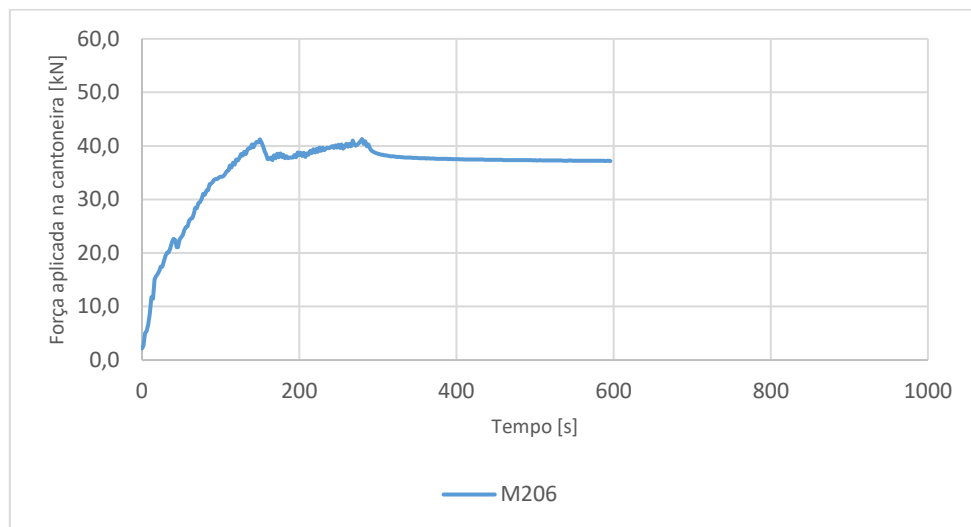


Figura 4.23 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa)

Da observação dos diagramas força-deslocamento e força-rotação, Figura 4.24 e Figura 4.25 é possível verificar que durante o ensaio da ligação inferior, o defletómetro D4 registou um deslocamento muito superior em relação ao deslocamento registado em D1. Estes deslocamentos resultaram numa rotação da cantoneira dentro do plano do murete, menos acentuada que a rotação verificada para fora do plano do murete.

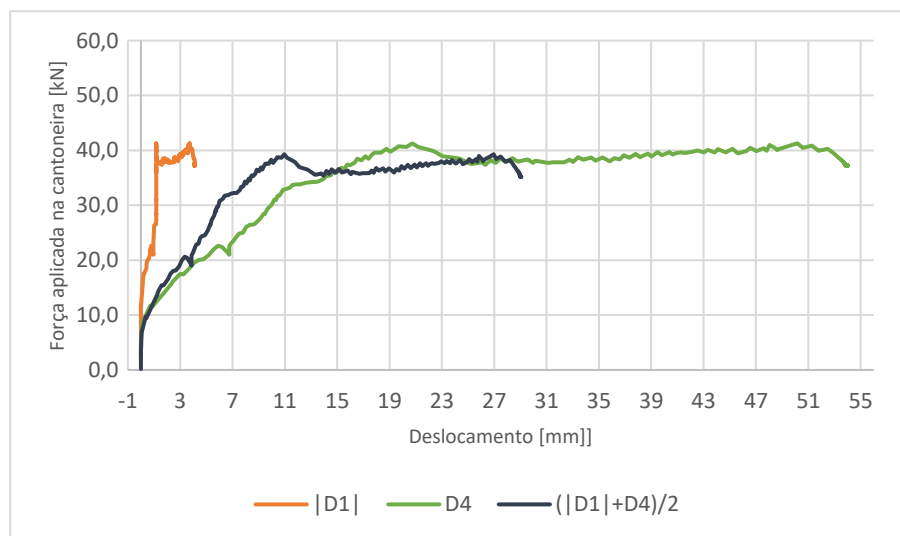


Figura 4.24 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa)

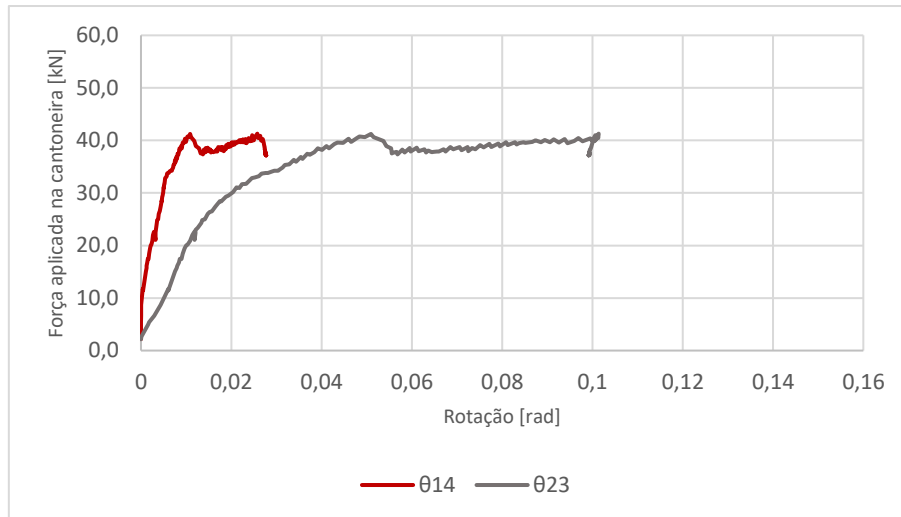


Figura 4.25 - Diagrama força-rotação do ensaio da ligação inferior do murete M206 (1ª tentativa)

## **2º Tentativa**

Após a retificação e colocação das chapas metálicas, procedeu-se à realização do ensaio das ligações às cargas verticais. Para se iniciar o ensaio aplicou-se, tal como na 1ª tentativa, uma pré-carga sobre o murete de 96 kN corresponde uma tensão de 0,20 MPa. Esta tensão foi mantida constante até ao fim do ensaio.

### **Ligação ao nível intermédio**

Tal como na primeira tentativa, o ensaio iniciou-se com o aumento do carregamento aplicado através da bomba hidráulica manual. A este nível de um modo geral, não se verificaram alterações significativas no estado do murete, excetuando o esmagamento da camada de argamassa. A paragem do ensaio foi condicionada pelo contato entre a viga metálica e o perfil metálico. Na Figura 4.26 pode observar-se os danos resultantes do carregamento.



Figura 4.26 – Ensaio na ligação no nível intermédio (2ª tentativa)

Os valores máximos registados pelas células de carga CC2 e CC3, tal como a força máxima aplicada na cantoneira neste nível, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores máximos registados no ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa)

Murete	Nível da Ligação		CC2	CC3	Força máxima aplicada na cantoneira [kN]
M206	2ª Tentativa	Intermédio	118,61	59,02	61,59

O diagrama da evolução do carregamento aplicado na ligação intermédia do murete é apresentado na Figura 4.27.

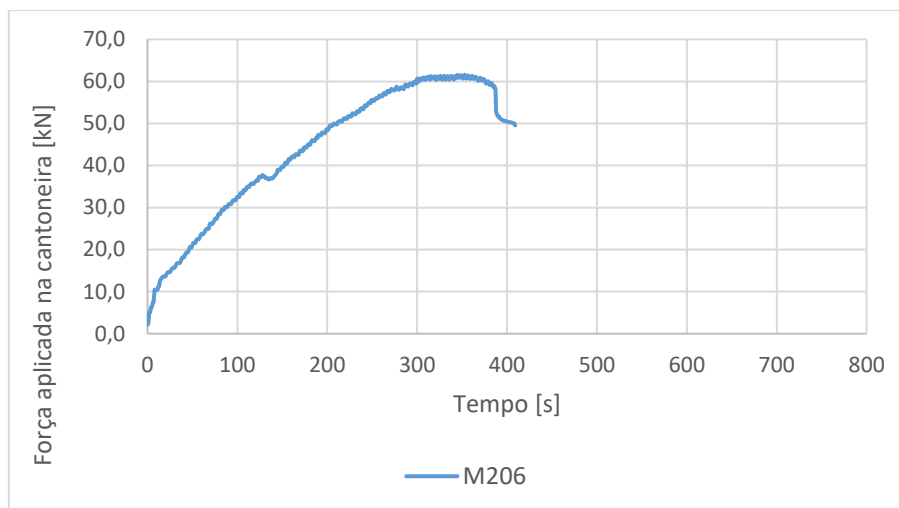


Figura 4.27 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa)

Da observação dos diagramas força-deslocamento e força-rotação, Figura 4.28 e Figura 4.29 é possível verificar que a rotação exercida pela cantoneira para fora do plano do murete é superior à registada até ao momento.

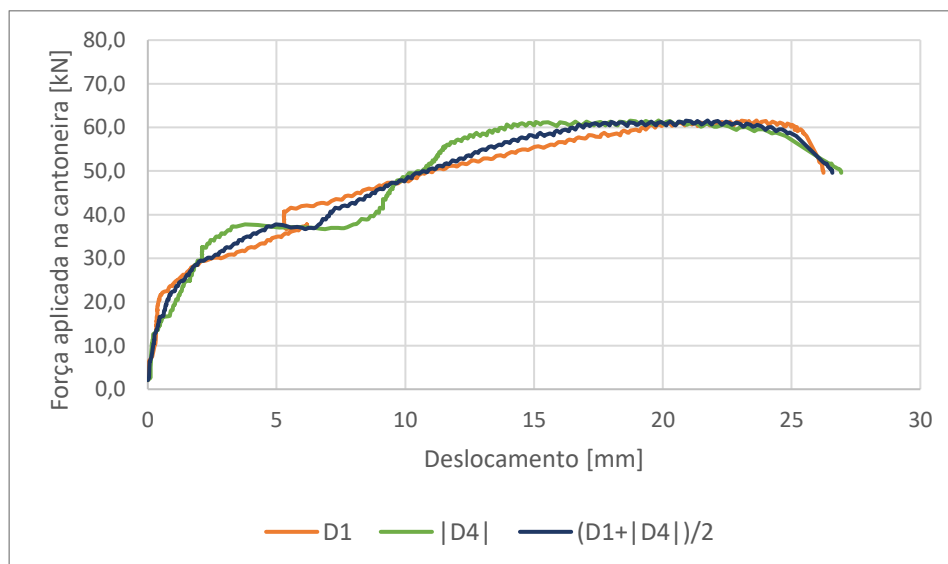


Figura 4.28 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa)



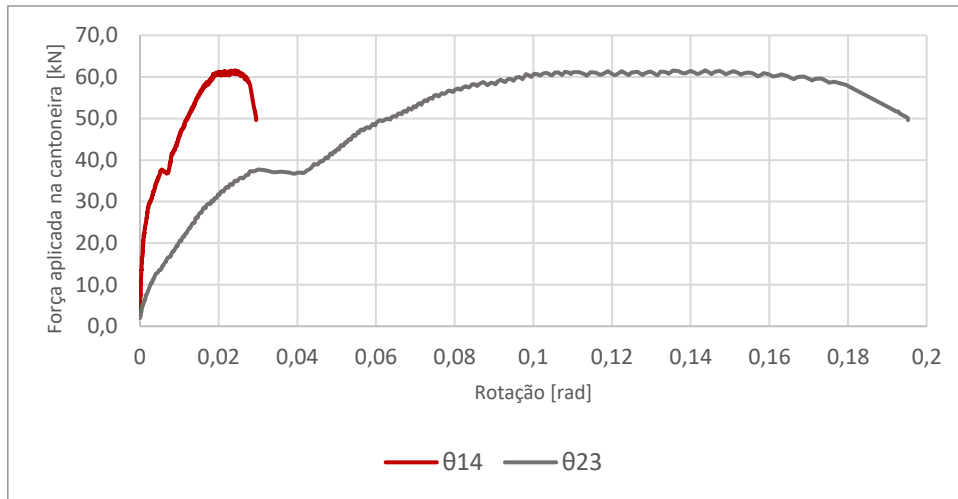


Figura 4.29 – Diagrama força-rotação do ensaio da ligação intermédia do murete M206 (2ª tentativa)

### Ligação ao nível inferior

Após a realização do ensaio na ligação do nível intermédio, o sistema de ensaio foi reajustado, reposicionando a cantoneira no nível inferior, tal como descrito previamente. Os danos observados foram similares aos do nível intermédio, Figura 4.30.



Figura 4.30 – Ensaio da ligação no nível inferior (2ª tentativa)

Os valores máximos registados pelas células de carga CC2 e CC3, tal como a força máxima aplicada na cantoneira ao nível inferior, estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Valores máximos registados no ensaio do nível inferior do murete M206 (2ª tentativa)

Murete	Nível da Ligação		CC2	CC3	Força máxima aplicada na cantoneira [kN]
M206	2ª Tentativa	Inferior	126,12	62,83	65,29

No diagrama da Figura 4.31, é apresentado a evolução do carregamento aplicado na ligação intermédia do murete.

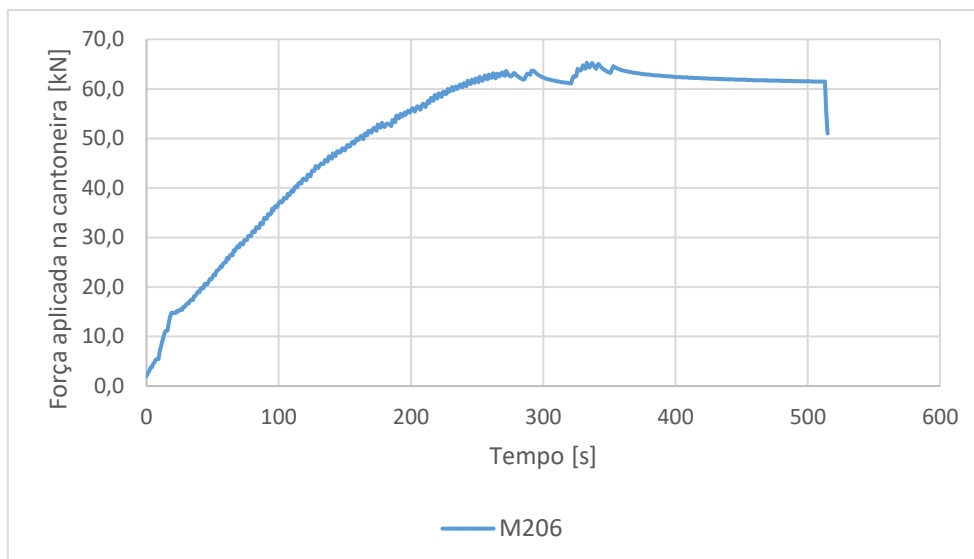


Figura 4.31 – Diagrama força-tempo do ensaio da ligação inferior do murete M206 (2ª tentativa)

Da observação dos diagramas força-deslocamento e o diagrama força-rotação, Figura 4.32 e Figura 4.33, observa-se que tal como o decorrido no nível intermédio, o comportamento da ligação a este nível, devido ao carregamento exercido, excede a rotação para fora do plano do murete comparativamente à primeira tentativa.

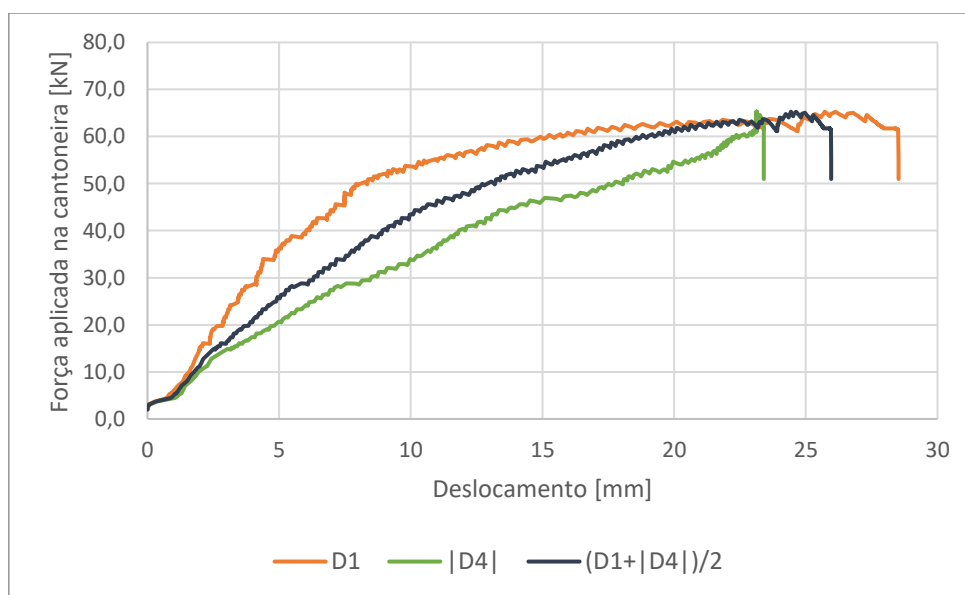


Figura 4.32 – Diagrama força-deslocamento do ensaio da ligação inferior do murete M206 (2ª tentativa)

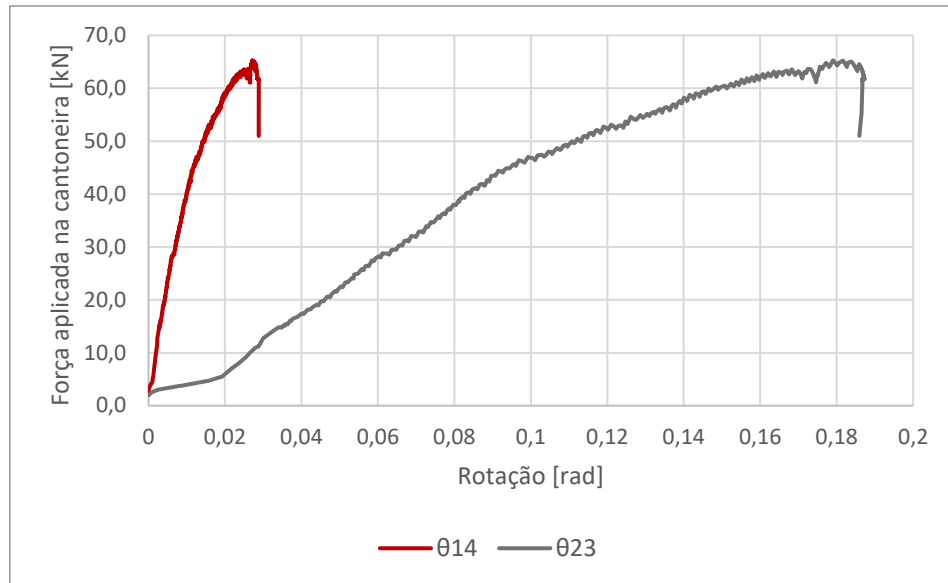


Figura 4.33 - Diagrama força-rotação do ensaio da ligação inferior do murete M206 (2ª tentativa)

#### 4.6.2 Ensaio de Compressão axial

Após ter sido efetuado o ensaio da ligação pavimento-parede às cargas verticais (2ª tentativa), tanto no nível intermédio como inferior, retiram-se todos os elementos dispensáveis, incluindo a cantoneira, as vigas (UPN300 e 2xUPN220) e as chapas metálicas da face tardo do murete. Para a realização deste ensaio permaneceram apenas os dois defletómetros no topo da viga metálica. Esta viga tem como finalidade distribuir as cargas aplicadas pelo cilindro hidráulico sobre o murete, Figura 4.34.



Figura 4.34- Vista do ensaio de compressão axial do murete M206

Neste ensaio, a célula de carga CC1 que mede a carga aplicada ao murete, encontra-se posicionada abaixo do cilindro hidráulico. Como tal para determinar a carga máxima vertical

aplicada ao murete M206 somaram-se às cargas registadas pela CC1, o valor do peso da viga metálica (V) e do lintel (L). O peso considerado para este conjunto de elementos foi de 6,4 kN (5,1 kN +1,3 kN).

Como referido anteriormente, o murete já se encontrava sujeito a um carregamento constante de 0,20 MPa, desde o início dos ensaios das ligações. O ensaio de compressão axial ao murete M206 demorou aproximadamente 17 minutos, iniciou-se quando o cilindro hidráulico (ENERPAC CLRG-3006) começou a exercer um carregamento crescente sobre o murete e terminou instantes após o mesmo atingir a rotura. O carregamento foi aplicado a uma velocidade de 0,15 bar/s. A força máxima registada pela célula de carga CC1 foi de 374,4 kN, que contabilizando o peso do conjunto dos elementos sobre o murete (lintel e viga metálica) atingiu os 380,8 kN, correspondente a uma tensão de 0,79 MPa, no instante  $t=949s$ .

No instante  $t=430s$ , foi possível observar o aparecimento de pequenas fendas localizadas na zona superior do murete, que com o decorrer do carregamento, foram aumentando na zona lateral esquerda deste. No instante  $t=949s$ , atingiu-se a força máxima registada e observou-se que a deformação registada do lado esquerdo era superior à do lado direito do murete. No instante  $t=973s$ , verificaram-se as primeiras quedas de argamassa do murete, localizadas a meia altura da alvenaria. Finalmente, no instante  $t=991s$ , ocorreu o destacamento de grande quantidade de material da zona lateral esquerda. Esse destacamento intensificou-se,  $t=996s$ , acabando por resultar no colapso parcial da zona superior do murete, mas não do seu completo desmoronamento,  $t=1006s$ , Figura 4.35.

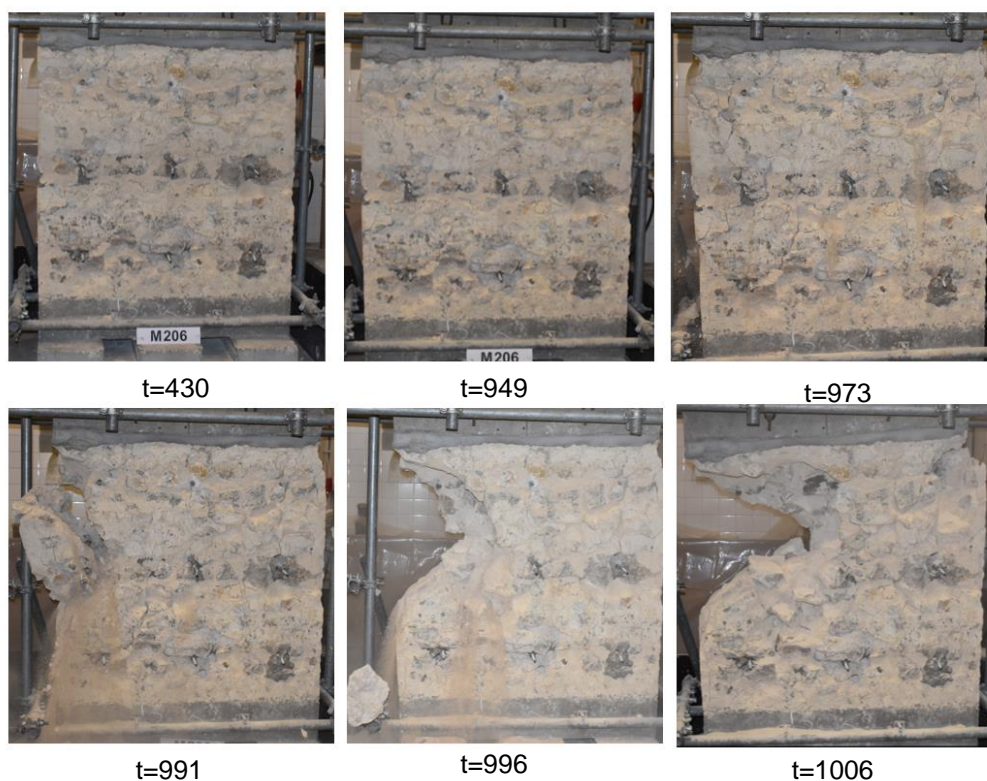


Figura 4.35 – Ensaio de compressão axial do murete M206.

A evolução do carregamento vertical aplicado ao murete M206, ao longo do ensaio de compressão axial, encontra-se apresentado no diagrama da Figura 4.36. Tal como referido no ensaio anterior, os diagramas foram prolongados até atingirem uma perda da capacidade resistente de 25% em relação à força máxima.

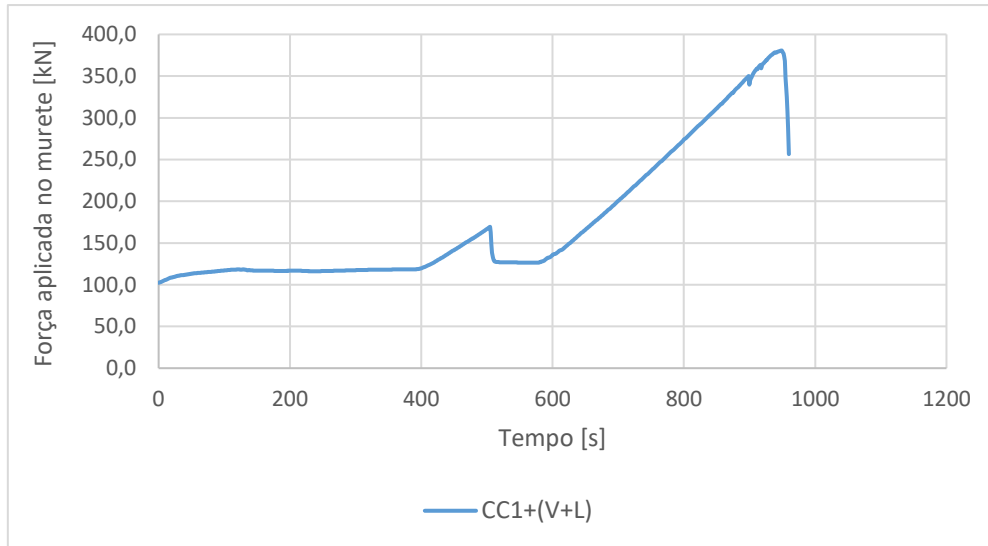


Figura 4.36 - Diagrama Força-Tempo do ensaio de compressão axial ao murete M206

Para determinar a tensão aplicada no murete M206, calcula-se o quociente entre a carga máxima aplicada (380,8 kN) e a área de atuação em planta ( $1,20 \times 0,4 \text{ m}^2$ ). A deformação é calculada através dos registos obtidos dos defletómetros localizados no topo do murete, D5 e D6, fazendo o quociente entre o deslocamento médio dos dois defletómetros e a altura do murete (1,20m). O diagrama tensão-deformação é apresentado na Figura 4.37, registando-se o valor da resistência do murete M206 de 0,79 MPa com uma deformação correspondente de 7,4 ‰. De modo a prolongar o diagrama até à origem, foi necessário proceder a uma translação do mesmo, obtendo assim uma deformação máxima correspondente a 8,1 ‰ para a tensão verificada.

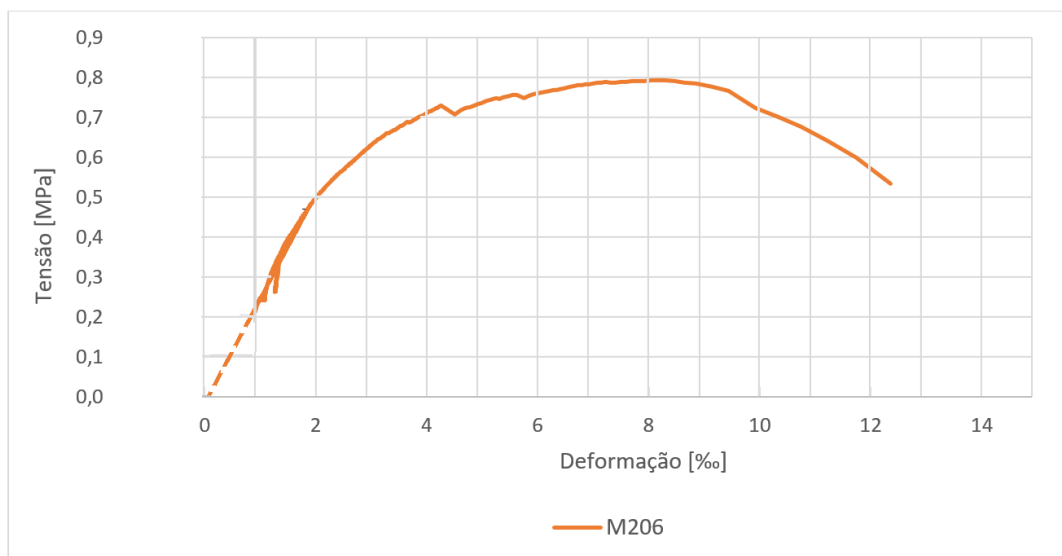


Figura 4.37 - Diagrama Tensão-Deformação do ensaio de compressão axial ao murete M206

### 4.6.3 Carbonatação

A carbonação é um fenómeno químico que ocorre quando o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente na argamassa reage com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) existente na atmosfera, formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta reação ocorre devido a diversos fatores, tais como a temperatura, a estrutura porosa e a humidade relativa. No caso prático dos muretes, a penetração do dióxido de carbono no seu interior é mais demorada, podendo mesmo levar anos ou décadas a verificar-se a ocorrência desta reação.

A sua avaliação pode ser efetuada com recurso a uma solução alcoólica de fenolftaleína (indicador químico do pH), que em contato com argamassa não carbonatada (zonas alcalinas) reage apresentando uma cor púrpura, e em contato com argamassa carbonatada (zona ácida ou neutra) permanece incolor. Assim, após a realização do ensaio de compressão axial, procedeu-se à análise do murete M206 e à determinação das respetivas profundidades de carbonatação, Figura 4.38. Esta análise consistiu em pulverizar o murete com a solução alcoólica de fenolftaleína, observando as zonas de alteração de coloração da argamassa e determinando a sua distância à superfície do murete. Caso as medições efetuadas apresentassem valores iguais a 200mm, profundidade correspondente a metade da espessura do murete, o mesmo encontrava-se totalmente carbonatado.



Figura 4.38- Medição da profundidade de carbonatação

Na Tabela 4.7, são apresentadas as medições da profundidade de carbonatação realizadas ao murete M206, assim como a média dos mesmos.

Tabela 4.7 – Profundidade de carbonatação M206

Medições	Profundidade de carbonatação (mm)
1	95
2	125
3	100
4	115
5	130
6	90
Média	109,2
Média (%)	54,6

# Capítulo 5

## Análise e discussão de resultados

### 5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se a análise dos resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior. Numa primeira parte, são comparados os resultados obtidos das duas fases do ensaio das ligações e posteriormente comparados com os trabalhos realizados na FCT UNL, dentro da mesma linha de investigação. Os resultados obtidos do ensaio das ligações do murete M206 são comparados com os valores obtidos através do método *dowel action*, adaptado a alvenaria de pedra tradicional e cal, sendo apresentada também a verificação das tensões dos resultados obtidos. Numa segunda parte, são comparados os resultados obtidos dos ensaios de compressão axial e das profundidades de carbonatação com os de Pinho (2007) e de outros trabalhos desenvolvidos na FCT-UNL.

### 5.2 Análise de resultados do ensaio da ligação pavimento-parede

Tal como referido posteriormente, devido a um lapso na montagem do sistema de ensaio da ligação pavimento-parede, obtiveram-se dois conjuntos de resultados referentes a cada nível de ligação do murete M206. Esses resultados são apresentados na tabela 5.1, e são referentes aos valores registados pelas células de carga CC2 e CC3, e pela força máxima aplicada na cantoneira durante a realização do ensaio.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio da ligação às cargas verticais obtidos para o murete M206

Murete	Nível da Ligação		CC2 [kN]	CC3 [kN]	Força máxima aplicada na cantoneira [kN]
M206	1ª Tentativa	Intermédio	90,96	44,35	48,61
		Inferior	76,58	37,3	41,29
	2ª Tentativa	Intermédio	118,61	59,02	61,59
		Inferior	126,12	62,83	65,29

O valor da força máxima aplicada à cantoneira é dada pela diferença entre o carregamento registado nas células de carga CC2 e CC3, e contabilizado com o peso próprio da cantoneira e das vigas que nela apoiam (2 kN). Este valor é dado pela expressão de cálculo seguinte:

$$F_{cantoneira} = (CC2 - CC3) + (2) \quad (5.1)$$

Em que,

$F_{cantoneira}$  - Força aplicada pela cantoneira em (kN);

CC2 – Carregamento registado pela célula de carga localizada aproximadamente a meio vão da viga metálica que simula o pavimento em (kN);

CC3 – Carregamento registado pela célula de carga localizada na extremidade da viga metálica oposta ao apoio da cantoneira em (kN);

Tendo por base os resultados obtidos deste ensaio experimental, pode observar-se que a força aplicada na cantoneira para as ligações realizadas na 1ª tentativa apresentam um valor consideravelmente mais pequeno do que os obtidos na 2ª tentativa. Esta relação já era expectável e deve-se ao facto de na 2ª tentativa, se ter retificado e aplicado as chapas metálicas pertencentes ao sistema de ancoragem. Comparando os valores médios obtidos em cada tentativa, pode-se observar um aumento de 30% da solicitação da ligação, da passagem da 1ª para a 2ª tentativa.

Os registos obtidos pelos defletómetros, D1 a D4, permitiram analisar os deslocamentos efetuados pela cantoneira ao longo do tempo. Apartir destes registos foi possível determinar a rotação que a mesma efetuou dentro ( $\theta_{14}$ ) e fora ( $\theta_{23}$ ) do seu plano de atuação. As expressões correspondentes ao cálculo dessas rotações, apresentam-se em seguida:

$$\theta_{14} = \tan^{-1}\left(\frac{(\delta_1 - \delta_4)}{\overline{D14}}\right) \quad (5.2)$$

Em que,

$\theta_{14}$ - Rotação medida no plano da cantoneira em (rad);

$\delta_1$ - Deslocamento registado pelo defletómetro D1 em (mm);

$\delta_4$ - Deslocamento registado pelo defletómetro D4 em (mm)

$\overline{D14}$ - Distância medida paralelamente à cantoneira entre os defletómetros D1 e D4 em (mm).

$$\theta_{23} = \tan^{-1}\left(\frac{(\delta_{23} - \delta_{14})}{\overline{D12}}\right) \quad (5.3)$$

Em que,

$\theta_{23}$ - Rotação medida no plano perpendicular à cantoneira, em (rad);

$\delta_{23}$ - Deslocamento médio entre os registos do defletómetro D2 e D3, em (mm);

$\delta_{14}$ - Deslocamento médio entre os registos do defletómetro D1 e D4, em (mm);



$\overline{D12}$ - Distância medida perpendicularmente à cantoneira entre os defletómetros D1 e D2, em (mm).

Na Tabela 5.2, apresentam-se os resultados obtidos por outros autores dentro da mesma linha de investigação na realização deste ensaio. Indicando-se os valores correspondentes à força máxima aplicada na cantoneira, os deslocamentos médios associados e as rotações correspondentes.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos para o ensaio das ligações por autores dentro da mesma linha de investigação

Murete	Nível da Ligação		Força máxima aplicada na cantoneira [kN]	Deslocamentos verticais		Rotação da cantoneira	
				$\delta_{14}$ [mm]	$\delta_{23}$ [mm]	$\theta_{14}$ [rad]	$\theta_{23}$ [rad]
M215 (Martins,2014)	Intermédio		15,8	19,8	55,65	0,021	0,135
M209 (Simões,2015)	Superior		13,63	11,28	33,88	0,01	0,06
	Inferior		15,07	3,22	13,09	0	0,02
M205 (Hritiu,2016)	Superior		44,15	21,3	54,36	0,012	0,094
	Intermédio		39,94	15	45,31	0,002	0,086
	Inferior		55,35	29,31	66,22	0,021	0,105
M206	1ª Tentativa	Intermédio	48,61	14,22	43,73	0,009	0,073
		Inferior	41,29	23,23	67,64	0,026	0,101
	2ª Tentativa	Intermédio	61,59	21,7	59,77	0,002	0,095
		Inferior	65,29	24,4	73,7	0,001	0,123

Comparativamente aos trabalhos anteriormente desenvolvidos dentro desta linha de investigação, constata-se que a ligação pavimento-parede com recurso a conectores (2ª tentativa), adotada no murete M206, possui uma capacidade de carga superior em relação às ligações por pregagens efetuadas pelos restantes autores.

### 5.2.1 Mecanismo de ferrolho (*dowel action*)

O método de *dowel action* (*Model Code* 1990) (CEB,1993) é um método de cálculo utilizado em estruturas de betão armado para determinar a resistência ao corte de um varão de aço. Apesar de a expressão não ter sido desenvolvida para alvenarias de pedra, assume-se que o seu mecanismo de rotura assenta no mesmo princípio.

Para o cálculo do esforço máximo de corte são utilizadas as seguintes expressões de cálculo, enunciadas no *Model Code* 1990:

$$F_{ud} = \frac{1,30}{\gamma_{Rd}} \cdot \phi_b^2 \cdot \left[ \sqrt{1 + (1,30 \cdot \varepsilon)^2} - 1,30 \cdot \varepsilon \right] \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd} \cdot (1 - \xi^2)} < \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon = 3 \cdot \frac{e}{\phi_b} \cdot \sqrt{\frac{f_{cd}}{f_{yd}}} \quad (5.5)$$

$$\xi = \frac{\sigma}{f_{yd}} \quad (5.6)$$

$$\sigma = \frac{F_{TR}}{A_s} \quad (5.7)$$

Em que,

$\gamma_{Rd}$  – coeficiente parcial;

$\phi_b$  – diâmetro do varão, em (mm);

$f_{cd}$  – valor de cálculo da resistência à compressão do betão, em (MPa);

$f_{yd}$  – valor de cálculo da tensão de cedência do aço do ferrolho, em (MPa);

$A_s$  – secção resistente do ferrolho, em (mm<sup>2</sup>);

$e$  – excentricidade da força, em (mm);

$F_{TR}$  – Força de tração no ferrolho, em (N).

A expressão de cálculo 5.4, teve de ser readaptada de modo a integrar as condições de uma alvenaria de pedra no cálculo da resistência ao corte. Como tal, começou por se adoptar para o coeficiente parcial  $\gamma_{Rd}$ , um valor unitário, visto se pretender uma comparação com os resultados obtidos experimentalmente. O valor da resistência à compressão do betão,  $f_{cd}$ , substitui-se por  $f_{cm}$  adaptando-se ao valor médio da resistência à compressão da alvenaria, que no caso do murete M206 é dado por  $f_{cm}=0,79$  MPa. O valor da tensão de cedência do aço,  $f_{yd}$ , passa a ter a designação de  $f_{yk}$ , e adopta o valor referente ao aço dos varões igual a  $f_{yk}=400$  MPa. A

expressão 5.8, corresponde ao cálculo efetuado com as alterações referidas para determinar a resistência ao corte dos varões.

$$F_{um} = 1,3 \cdot \phi_b^2 \cdot \left[ \sqrt{1 + (1,30 \cdot \varepsilon)^2} - 1,30 \cdot \varepsilon \right] \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{yk} \cdot (1 - \xi^2)} < \frac{A_s \cdot f_{yk}}{\sqrt{3}}$$

Em que,

(5.8)

$F_{um}$  – Resistência ao corte dos varões

$\phi_b$  – diâmetro do varão, em (mm);

$\varepsilon$  – coeficiente que depende do valor de  $f_{cd}$  e de  $f_{yd}$

$\xi$  – relação entre a tensão axial da pregagem e o valor de cálculo da resistência à tração do aço

Ao aplicar-se a expressão 5.8, para determinar a resistência ao corte máximo dos varões da ligação, esta verificou-se ser pouco precisa, visto que os valores obtidos a partir do seu cálculo não se aproximavam dos resultados obtidos experimentalmente, tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores obtidos para determinação da resistência máxima de corte, através da expressão 5.8

	Ligação		Ftr [kN]	As [mm²]	$\sigma$ [MPa]	$\xi$	$\varepsilon$	Fum [kN]	Fv exp [kN]	Fum/Fv exp
M206	1ª tentativa	Intermédio	25,86	98,5	262,53	0,66	0,24	1,61	16,20	0,100
		Inferior	21,97		223,00	0,56		1,77	13,76	0,129
	2ª tentativa	Intermédio	32,77		332,63	0,83		1,19	20,53	0,058
		Inferior	34,74		352,62	0,88		1,01	21,76	0,046

Para a definição de uma expressão que permita caracterizar a resistência ao corte máxima das ligações e que se adeque aos resultados experimentais obtidos, é necessário proceder a um estudo paramétrico, avaliando deste modo diferentes modelos experimentais, com parâmetros variáveis, tais como diferentes resistências dos muretes, resistências do aço, diâmetros de varões e furações, entre outros.

A expressão 5.9, definida por Hritiu (2016), foi reajustada a partir da expressão cálculo (5.4) através de alteração de diversos parâmetros, tais como o fator  $\beta$ , que foi definido a partir da relação entre a força de tração instalada no varão e o carregamento vertical efetuado. Um outro parâmetro modificado foi  $\phi_b$  por  $\phi_g$ , tendo por base a semelhança verificada entre o

comportamento do conjunto varão/grout e o comportamento do conjunto varão/betão. As expressões associadas a estes parâmetros encontram-se em baixo definidas.

$$F_{um} = \beta \times \phi_g^2 \left[ \sqrt{1 + (1.3\varepsilon)^2} - 1.3\varepsilon \right] \sqrt{f_{cm} \times f_{yk} (1 - \xi^2)} < \frac{A_s \times f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad (5.9)$$

$$\sigma = \frac{F_{TR}}{A_g} \leq \frac{F_{TR}}{A_s} \quad (5.10)$$

$$\beta = \frac{F_{TR}}{4900} \quad (5.11)$$

$$A_g = \frac{\pi \phi_g^2}{4} \quad (5.12)$$

Em que,

$f_{cm}$  – valor de cálculo da resistência à compressão do murete, em (MPa);

$f_{yk}$  – valor de cálculo da tensão de cedência do aço do ferrolho, em (MPa);

$\phi_g$  – diâmetro do furo preenchido com grout, em (mm);

$F_{TR}$  - força de tração instalada nos ferrolhos, em (N);

$A_g$  – Área da secção do conjunto varão/grout, em (m<sup>2</sup>);

Para quantificar a resistência ao corte dos varões no murete M206, através da expressão 5.9, foi determinada a força de tração envolvida na ligação com base no mecanismo representado na Figura 5.1 e através das equações de equilíbrio das expressões 5.13, 5.14 e 5.15.

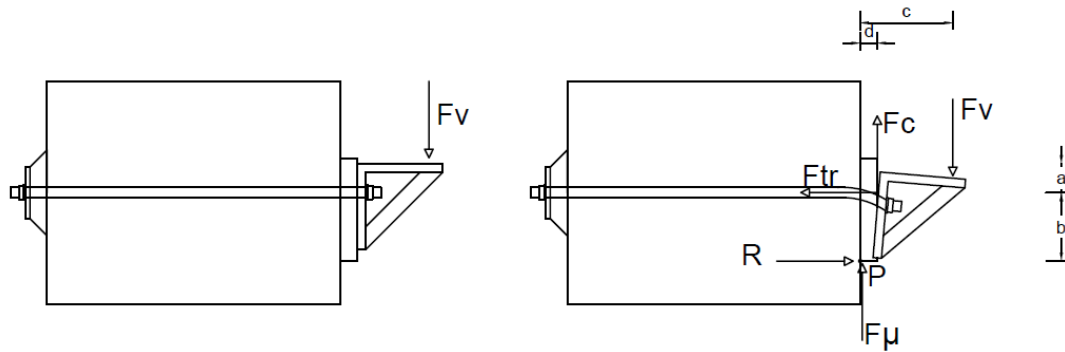


Figura 5.1 - Representação esquemática do mecanismo utilizado para determinar de Ftr

$$\sum F_{\text{verticais}} = 0 \Leftrightarrow F_v - F_c - F_{\mu} = 0 \quad (5.13)$$

$$\sum M_p = 0 \Leftrightarrow F_v \times c - F_c \times d - F_{TR} \times b = 0 \quad (5.14)$$

$$F_{\mu} = \mu \times F_{TR} \quad (5.15)$$

Onde,

$\mu$ - coeficiente de atrito=0,4;

$F_c$  – Força de corte, em (kN);

$F_{\mu}$  – Força de atrito, em (kN);

$F_v$  – Força vertical aplicada no ferrolho, em (kN);

Após a determinação da força de tração exercida, com base no sistema de equações, aplicou-se a expressão 5.9, para quantificar a resistência ao corte, obtendo-se os valores expressos na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores obtidos para determinar a resistência máxima de corte, através da expressão 5.9

	Ligação		Ftr [kN]	As [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [MPa]	$\xi$	$\varepsilon$	Fum [kN]	Fv exp [kN]	Fum/Fv exp
M206	1ª tentativa	Intermédio	25,86	201,1	128,64	0,32	0,24	16,77	16,20	1,03
		Inferior	21,97		109,27	0,27		14,47	13,76	1,05
	2ª tentativa	Intermédio	32,77		162,99	0,41		20,49	20,53	1,00
		Inferior	34,74		172,78	0,43		21,45	21,76	0,99

Da análise da tabela 5.4, é possível observar que recorrendo à aplicação da expressão de cálculo desenvolvida por Hritiu (2016), os valores obtidos para a força máxima resistente de corte são próximos dos valores obtidos experimentalmente.

Contudo, verificou-se que existe uma certa redundância na definição desta expressão. Este faz depender a estimativa da força de corte máxima da força vertical aplicada experimentalmente através das equações de equilíbrio.

### 5.3 Verificação de Tensões

Neste ponto é apresentada uma breve verificação para averiguar se no decorrer do ensaio das ligações pavimento-parede, apenas atuavam compressões sobre o murete, e verificar, se caso de ocorrer se não excediam o valor obtido experimentalmente para a resistência à compressão do murete. Na Figura 5.2, apresenta-se uma representação esquemática do modelo de cálculo das tensões para o murete M206.

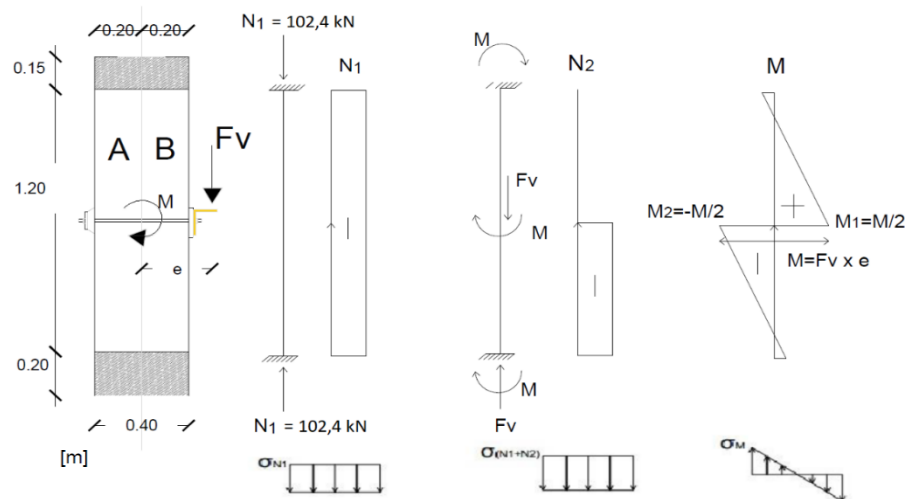


Figura 5.2 - Representação esquemática do modelo de cálculo das tensões aplicado

Na tabela 5.5 são apresentados os valores necessários para determinar as tensões presentes durante o ensaio das ligações. Para determinar o momento atuante provocado pela atuação da força vertical na cantoneira, foi considerado um valor de  $e=0.305\text{m}$ .

Tabela 5.5 - Esforços atuantes no murete durante o ensaio das ligações

Ligação		Fv [kN]	N1 [kN]	N2 = N1 + Fv [kN]	M= Fv x e [kN]	M1=M/2 [kN]	M2=-M/2 [kN]
1ª tentativa	Intermédio	-48,61	-102,4	-151,01	14,83	7,41	-7,41
	Inferior	-41,29	-102,4	-143,69	12,59	6,30	-6,30
2ª tentativa	Intermédio	-61,59	-102,4	-163,99	18,78	9,39	-9,39
	Inferior	-65,29	-102,4	-167,69	19,91	9,96	-9,96

Na tabela 5.6, são apresentados os valores correspondentes às tensões a atuarem no murete

durante o ensaio das ligações pavimento-parede, tal como a verificação das compressões. O valor obtido experimentalmente para a resistência à compressão do murete M206 é de 0,79 MPa.

Tabela 5.6 - Verificações de tensão

Ligação		Posição	$\sigma_{N1} + \sigma_{M1}$ (MPa)	$\sigma_{N2} + \sigma_{M2}$ (MPa)	Verificações	Verificações
					Compressão $\geq -0,79$	Tração $\leq 0$
1ª tentativa	Intermédio	A	0,018	-		Não verifica
		B	-	-0,546	Verifica	
	Inferior	A	-0,016	-		Verifica
		B	-	-0,496	Verifica	
2ª tentativa	Intermédio	A	0,080	-		Não verifica
		B	-	-0,635	Verifica	
	Inferior	A	0,098	-		Não verifica
		B	-	-0,661	Verifica	

Da análise da tabela 5.6, verifica-se que para o murete M206, as tensões de compressão exercidas durante o ensaio das ligações às cargas verticais, em ambas as tentativas, não excederam o valor da tensão de compressão obtida experimentalmente de 0,79 MPa. Contudo, verifica-se ainda que surgem tensões de tração na alvenaria. A existência de tensões de tração pode conduzir à rotura, no entanto ao surgirem pode ter havido uma redistribuição das tensões de modo a equilibrar os esforços.

#### 5.4 Análise dos resultados da compressão axial e comparação com trabalhos de referência

Neste ponto são comparados os resultados do ensaio de compressão axial com os valores obtidos por Pinho (2007) e outros autores dentro da mesma linha de investigação. Os valores comparados, incidem unicamente em muretes construídos com os métodos construtivos, materiais e proporções semelhantes aos do murete M206.

Na Figura 5.3 apresenta-se um diagrama em que se compara as resistências à compressão axial obtidas pelos diferentes autores com o murete M206.

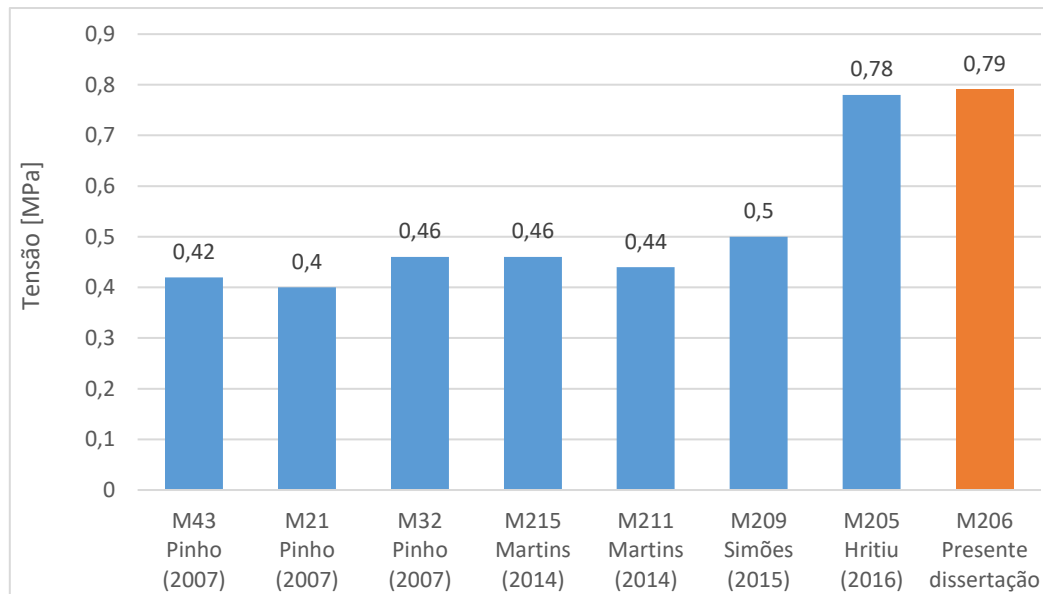


Figura 5.3 – Diagrama de comparação de resultados da resistência à compressão

Com a análise do diagrama da Figura 5.3, verifica-se que os valores obtidos para a resistência à compressão do murete M206 são superiores aos resultados dos outros autores. Este facto pode ser interpretado de diferentes perspetivas. Primeiramente, a resistência do murete M206 é influenciada pela presença dos elementos de confinamento transversal usados no ensaio das ligações pavimento-parede. Apesar de terem sido retirados todos os elementos dispensáveis ao ensaio de compressão, nomeadamente a cantoneira, o perfil metálico e as chapas metálicas de ancoragem, existem outros que passam a ser inerentes ao murete (varões e calda), atribuindo-lhe resistência. Por outro lado, com o passar do tempo verifica-se um aumento gradual da carbonatação dos muretes, influenciando a resistência das argamassas constituintes e por sua vez a resistência mecânica do murete. Apesar de todos os muretes apresentados no diagrama da Figura 5.3, terem sido construídos segundo os mesmos processos construtivos, materiais e proporções, é impossível obter a mesma resistência devido à heterogeneidade da alvenaria de pedra.

Ao aplicar a expressão proposta por Pinho e Lúcio (2017), utilizada para estimar a resistência à compressão de um modelo experimental em alvenaria em função da área carbonatada, verifica-se que quando aplicada ao murete M206 o valor da tensão é inferior à experimentalmente obtida, 0,65 MPa.

$$\sigma^{max} = 0,91 \cdot \left( \frac{Ca}{A} \right) + 0.08 \quad (5.9)$$

Em que,

$\sigma^{max}$  – Resistência à compressão da alvenaria, em [MPa]

$Ca$  – Área carbonatada, em [mm<sup>2</sup>];

$A$  – Área da secção de alvenaria, em [mm<sup>2</sup>].



No diagrama da Figura 5.4, apresenta-se a relação entre a resistência de compressão e o rácio de carbonatação ( $Ca/A$ ) (0,628), podendo observar-se que para o murete M206 essa relação está acima da evolução prevista.

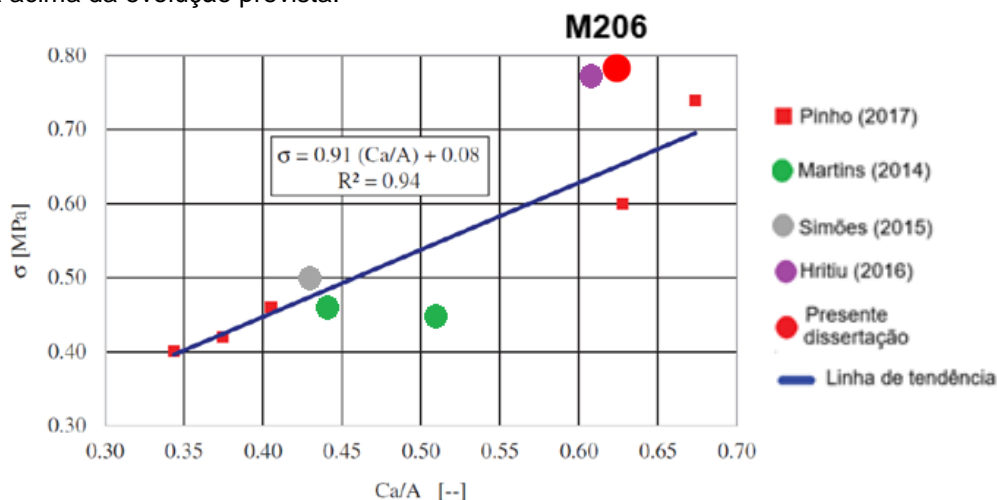


Figura 5.4 – Diagrama da evolução da resistência à compressão da alvenaria em relação ao rácio de carbonatação da argamassa  
(Adaptado de Pinho e Lúcio, 2017)

## 5.5 Análise dos resultados da profundidade de carbonatação e comparação com trabalhos de referência

Como referido anteriormente no ponto 4.6.3, o valor médio das medições efetuadas ao murete M206 foi de 109,2mm. Este valor corresponde a uma profundidade de carbonatação de 54,6% do murete. Na Figura 5.5, apresenta-se o valor médio obtido da profundidade de carbonatação do murete M206, bem como, os valores correspondentes aos muretes usados em Pinho (2007) e os pertencentes à mesma linha de investigação. Pode-se observar pelo diagrama, que o valor da profundidade de carbonatação do murete M206 comparativamente aos restantes da 2ª série, se encontra ligeiramente acima da linha de tendência estimada por Pinho e Lúcio (2017).

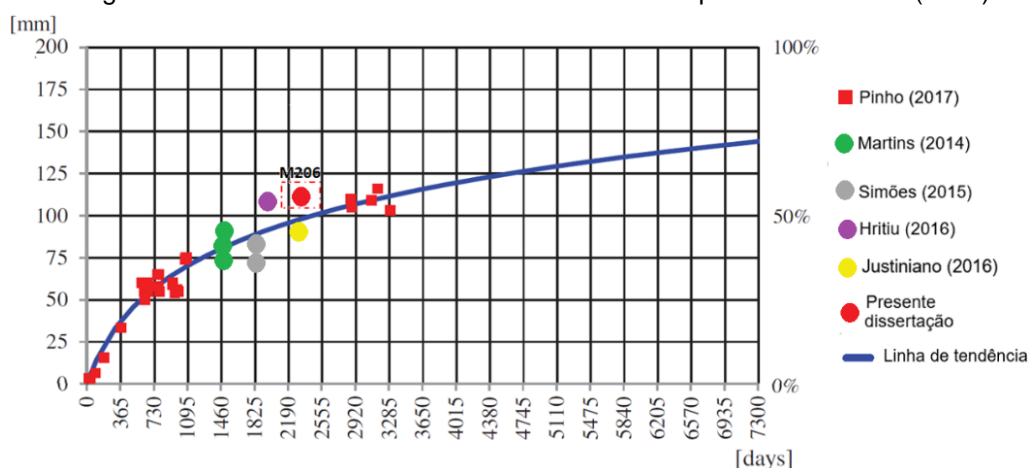


Figura 5.5 – Diagrama da evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo  
(Adaptado de Pinho e Lúcio, 2017)

Aplicada a expressão seguinte, apresentada por Pinho e Lúcio (2017), para estimar a profundidade de carbonatação em função da idade do murete (dias) aquando do ensaio, verificou-se que para o murete M206, essa profundidade estimada é excedida em 11%.

$$Cd(t) = 43 \times \ln(t + 270) - 240 \quad (5.10)$$

Em que,

$Cd$  – Profundidade de carbonatação, medida do exterior para o interior do murete, em [mm];

$t$ - Tempo, em [dias].

# Capítulo 6

## Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Considerações iniciais

No presente capítulo faz-se de uma forma geral a síntese do trabalho desenvolvido na presente dissertação, através das conclusões retiradas da análise dos resultados experimentais e analíticos.

### 6.2 Conclusões

Com base na pesquisa bibliográfica efetuada, apresentam-se alguns estudos realizados no âmbito das ligações pavimento-parede, em que se verifica a adoção e análise experimental de algumas soluções utilizadas para reforçar esta ligação. O estudo destas soluções de reforço permitiu antecipar algumas situações de rotura geralmente verificadas ao nível da ligação e enquadrá-las no trabalho experimental desenvolvido.

A presente dissertação, encontra-se inserida numa linha de investigação iniciada em 2013, com o objetivo de estudar o comportamento das ligações existentes entre os pavimentos e as paredes de alvenaria de pedra tradicional. O presente trabalho focou-se na análise experimental dessa ligação executada com recurso a conectores metálicos. Essa análise foi feita através de um modelo experimental em alvenaria de pedra (murete), no qual se pretendeu dimensionar a capacidade de carga da ligação quando sujeita a cargas verticais. Para além desse dimensionamento, foi determinada a resistência à compressão axial e a profundidade média de carbonatação do modelo experimental.

No decorrer do ensaio experimental ocorreu um lapso de montagem (falta de chapas metálicas de ancoragem), o que levou à repetição do ensaio das ligações. Foram no total ensaiadas quatro ligações, duas a cada nível. Após a conclusão da segunda tentativa, verificou-se que comparativamente à primeira, a solicitação da ligação foi superior em 30%, devido à correção efetuada. O valor do carregamento máximo aplicado na cantoneira verificou-se para o nível inferior da segunda tentativa, apresentando um valor de 65,29kN.

Com base nos ensaios das ligações pavimento-paredes efetuados ao murete M206, tentou-se estimar a força de corte máxima instalada nos ferrolhos, aplicando a expressão 5.8, enunciada no Model Code 1990 (1993). No entanto, esta verificou ser pouco precisa, visto que os valores obtidos a partir do seu cálculo não se aproximavam dos resultados obtidos experimentalmente.

A expressão 5.9, definida por Hritiu (2016), foi reajustada a partir da expressão cálculo 5.8, através de alteração de diversos parâmetros. Da sua análise foi possível observar que os valores obtidos para a força máxima resistente de corte são próximos dos valores obtidos experimentalmente. Contudo, verificou-se que existe uma certa redundância na definição desta expressão, visto que o autor faz depender a estimativa da força de corte máxima da força vertical.

O valor obtido para a resistência à compressão do murete M206 é de 0,79 MPa, superior aos resultados dos outros restantes autores comparados. Este facto pode ser interpretado de diferentes perspetivas. Primeiramente, a resistência do murete M206 é influenciada pela presença dos elementos de confinamento transversal usados no ensaio das ligações pavimento-parede, atribuindo-lhe resistência. Por outro lado, com o passar do tempo verifica-se um aumento gradual da percentagem de carbonatação dos muretes, influenciando a resistência das argamassas constituintes e por sua vez a resistência mecânica do murete. Apesar de todos os muretes comparados terem sido construídos segundo os mesmos processos construtivos, materiais e proporções, é impossível obter a mesma resistência devido à heterogeneidade da alvenaria de pedra. Ao aplicar a expressão enunciada por Pinho e Lúcio (2017), utilizada para estimar a resistência à compressão de um modelo experimental em alvenaria em função da área carbonatada, verifica-se que quando aplicada ao murete M206 o valor da tensão é inferior à experimentalmente obtida, 0,65 MPa.

O valor médio das medições efetuadas ao murete M206 foi de 109,2mm. Este valor corresponde a uma profundidade de carbonatação de 54,6% do murete. O seu valor comparativamente aos restantes da 2ª série, encontra-se ligeiramente acima da linha de tendência estimada por Pinho e Lúcio (2017).

### **6.3 Trabalhos futuros**

Na sequência do trabalho experimental realizado, apresentam-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Continuar a linha de investigação existente, procurando analisar e aprofundar os conhecimentos sobre as ligações pavimento-parede.
- Analisar o comportamento entre o pavimento e a alvenaria de pedra através da adoção de outras soluções de ligação
- Realizar ensaios em que se adotem diferentes parâmetros, nomeadamente, variações de diâmetros dos furos, variações de diâmetros dos varões, variações da dimensão da cantoneira.
- Continuar a análise da profundidade de carbonatação de modo a contribuir com novos valores no gráfico profundidade de carbonatação-tempo

# Referências Bibliográficas

- Appleton, J., 2003. *Reabilitação de Edifícios Antigos, Patologias e Tecnologias de Intervenção*. Edições Orion, Lisboa
- Appleton, J., 2012. *Projeto de consolidação e reforço de estruturas de alvenaria: as técnicas e a ética*. Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria. Lisboa, 2012
- Arêde, A., Costa, A., 2016. *Construções tradicionais de alvenaria de pedra: Comportamento e reforço sísmico*, in 10º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. Açores, Portugal.
- Arriaga, F. P., M. Esteban, I. Bobadilla, F. García, 2002. *Intervención en estructuras de madera – AITIM*. Madrid.
- Azevedo, H., D. S., 2010. *Reforço de Estruturas de alvenaria de pedra, taipa e adobe com elementos de madeira maciça*. Dissertação de Mestrado- Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto– FEUP, Porto.
- Baião, M., Lúcio, V., Pinho, F., and Coelho, A., *Aspetos da reabilitação de edifícios antigos de alvenaria*, in Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria, 2012, pp. 47–62.
- Brito, J., 2004. *Diagnóstico, Patologias e Reabilitação de construção de madeira*. Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências. FCTUC, Coimbra.
- CEN, EN 1015-11. *Methods of test for mortar for masonry - Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. 1999.
- CEN, EN 14146. *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico* (através da medição da frequência de ressonância fundamental). IPQ, 2006.
- CEN, NP EN 1097-3. *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Determinação da baridade e do volume de vazios*. IPQ, 2002.
- Cóias, V., 2007. *Reabilitação estrutural de edifícios antigos- alvenaria, madeira. Técnicas pouco intrusivas*. Argumentum, Gecorpa, 2ª edição, maio.
- Costa, F. P., 1995. *Enciclopédia Prática da Construção Civil*, F. Pereira da Costa – Portugal Editora, Lisboa.

- Costa, L., 2009. *Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado- Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto -FEUP, Porto.
- Dias, T., 2008. *Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnostico e intervenção estrutural*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto – FEUP, Porto.
- Ferreira, N., 2009. *Técnicas de ligação pavimentos/paredes em reabilitação de edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto – FEUP, Porto.
- Foo, S., 2002. *Guidelines for the Seismic upgrading of stone-masonry structures*. Technology Directorate Architectural and Engineering Services. Canada.
- Gomes, J., 1983. *Medidas destinadas a evitar o acesso da humidade do terreno às paredes dos edifícios*. LNEC, Lisboa.
- Gómez, C., 2007. *Rehabilitation of structural elements in Traditional Mediterranean Architecture*. Em RehabiMed Method: Traditional Mediterranean Architecture, Part II. Rehabilitation Buildings.
- Hritiu, V. C., 2016. *Análise experimental da ligação por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria de pedra tradicional*. Dissertação de Mestrado- FCT-UNL.
- INE, 2011. *Censos 2011*. Instituto Nacional de Estatística, Portugal, 2012.
- Justiniano, C.S., 2016. *Ligações por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria reforçadas*. Dissertação de Mestrado- FCT-UNL.
- Leitão, L., 1896. *Arma de Engenharia. Curso Elementar de Construções*. Imprensa Nacional, Lisboa.
- McCaig, I., 2012. *English Heritage's Practical Building Conservation*. Building Environment. Ashgate Publishing Limited, 2014.
- Martins, S., 2014. *Ligações pavimento/parede com pregagens para reabilitação de edifícios antigos*, Dissertação de Mestrado- FCT-UNL.
- Moreira, M., 2009. *Reabilitação de estruturas de madeira em edifícios antigos. Estudo de caso*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto-FEUP, Porto.
- Moreira, S. M. T., Ramos, L. F., Oliveira, D. V., Lourenço, P. B., & Mateus, L., 2014 (a). *Developing a seismic retrofitting solution for wall-to-floor connections of URM buildings with wood diaphragms*, in *9th International Masonry Conference*.

- Moreira, S., Ramos, L. F., Oliveira, D. V., and Lourenço, P. B., 2014 (b). *Experimental behavior of masonry wall-to-timber elements connections strengthened with injection anchors*, Eng. Struct., vol. 81, pp. 98–109, 2014.
- Pinho, F., Lúcio. V., 2017, Rubble Stone Masonry Walls in Portugal Materials Properties, Carbonation Depth and Mechanical Characterization, International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis and Restoration, pp. 1558-3066.
- Pinho, F., 2000. *Paredes de Edifícios Antigos em Portugal*. Coleção Edifícios. Nº 8. LNEC, Lisboa
- Pinho, F., 2007. *Paredes de Alvenaria Ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de Doutoramento- FCT-UNL.
- Roque, João C. A., 2002. *Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- Segurado, J. E. S., 1942. *Trabalhos de carpintaria civil*. Biblioteca de Instrução Profissional. Livraria Bertrand, Lisboa.
- Simões, L., 2015. *Ligação pavimentos/paredes de edifícios antigos. Ensaio e verificações de projeto*. Dissertação de Mestrado- FCT-UNL.
- Ribeiro, S., 2014. *Estudo do comportamento estrutural de paredes de tabique*. Dissertação de Mestrado-Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Rosa, C., *Caracterização de alvenarias de pedra antigas*. Dissertação de Mestrado-FCT-UNL.
- Teixeira, J. J. L., 2004. *Descrição do sistema construtivo de casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX. Contributo para uma história da construção arquitetónica em Portugal. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica*. FAUP, Porto.
- Tomazevic, M., 1999. *Repair and strengthening of masonry buildings*. EarthquakeResistent Design of Masonry Buildings.





# Anexos

## **Anexo I – Caracterização dos materiais**



**A1** – Resistência mecânica à flexão e à compressão, em prismas moldados, com 16\*4\*4 cm<sup>3</sup> de argamassa usada nas camadas de regularização – 1ª camada

Provete	Idade [dias]	F <sub>rot</sub> flexão [N]	σ <sub>rot</sub> flexão [MPa]	Média [MPa]	F <sub>rot</sub> compressão [N]	Média	Área de contato [mm²]	σ <sub>rot</sub> compressão [MPa]	Média [MPa]
1	140	1944,95	4,6	4,2	32895,7	27000,8	1600	16,9	13,6
					21105,8				
2		1546,46	3,6		32217,0	23773,3		14,9	
					15329,5				
3		2148	5		29335,5	21819,7		13,6	
					14304,0				
4		1745	4,1		32224,0	21742,0		13,6	
					11260,0				
5		1716,65	4		24419,7	18087,1		11,3	
					11754,5				
6		1604,04	3,8		26150,0	18423,0		11,5	
					10696,0				

**A2** – Módulo de elasticidade dinâmico, em prismas moldados, com 16\*4\*4 cm<sup>3</sup> de argamassa usada nas camadas de regularização – 1ª camada.

Prismas	1	2	3	4	5	6
Idade [dias]	140					
Massa [kg]	535,99	537,03	534,77	518,82	536,21	527,30
E [Mpa]	17928	20806	20198	18743	20499	20537
	21299	20763	21034	19008	20389	20502
	21403	20692	20039	18801	20141	20452
	21312	20703	21130	20127	20509	20461
Média	20485,5	20741	20600,25	19169,75	20384,5	20488

**A3** – Resistência mecânica à flexão e à compressão, em prismas moldados, com 16\*4\*4 cm<sup>3</sup> de argamassa usada nas camadas de regularização – 2ª camada.

Provete	Idade [dias]	F <sub>rot</sub> flexão [N]	σ <sub>rot</sub> flexão [MPa]	Média [MPa]	F <sub>rot</sub> compressão [N]	Média	Área de contato [mm²]	σ <sub>rot</sub> compressão [MPa]	Média [MPa]
1	134	1416,7	3,3	3,2	19341,4	14332,2	1600	9,0	9,6
					9322,92				
2		1104,0	2,6		15779,8	13792,8		8,6	
					11805,7				
3		1447,9	3,4		18403	14287,3		8,9	
					10171,55				
4		1714,4	4,0		22894,9	15745,1		9,8	
					8595,31				
5		1271,6	3,0		19790,45	13176,7		8,2	
					6563,02				
6		1271,6	3,0		25568	20905,0		13,1	
					16242				

**A4** – Módulo de elasticidade dinâmico, em prismas moldados, com 16\*4\*4 cm<sup>3</sup> de argamassa usada nas camadas de regularização – 2ª camada.

Prismas	1	2	3	4	5	6
Idade [dias]	134					
Massa [kg]	492,42	500,43	500,10	511,34	513,10	519,21
E [Mpa]	16109	14908	15715	18963	18214	18402
	15883	15039	15694	19776	18071	18460
	15984	14935	15309	18967	18117	18335
	16005	15121	15521	18956	18322	18343
Média	15995,25	15000,75	15559,75	19165,5	18181	18385

**A5** – Resistência mecânica à flexão e à compressão, em prismas moldados, com 16\*4\*4 cm<sup>3</sup> de calda de cimento

Provete	Idade [dias]	F <sub>rot</sub> flexão [N]	σ <sub>rot</sub> flexão [MPa]	Média [MPa]	F <sub>rot</sub> compressão [N]	Média	Área de contato [mm²]	σ <sub>rot</sub> compressão [MPa]	Média [MPa]	
1	112	1279,4	3,0	2,7	50731,6	51260,4	1600	32,0	26,0	
					51789,2					
2		1178,6	2,8		48108,5	41948,3		26,2		
					35788					
3		957,8	2,2		34961	31360,5		19,6		
					27760					

**A6** – Módulo de elasticidade dinâmico, em prismas moldados, com 16\*4\*4 cm<sup>3</sup> de calda de cimento

Prismas	1	2	3
Idade [dias]	112		
Massa [kg]	470,32	460,88	461,95
E [Mpa]	13918	18247	12770
	12707	14146	12755
	13385	14630	12884
	12516	14173	12963
Média	13131,5	15299	12843